

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta stavebná**  
**Katedra geotechniky a podzemního stavitel'stva**



**Experimentální stanovení ohybové a střižové únosnosti sklolaminátových  
kotevních tyčí**

**Bending and Shear Resistance of Fiberglass Bolt Rods Set up on Trials  
Specimens**

**Študent:**  
**Vedúci diplomovej práce:**

**Bc. Radoslav Kubuš**  
**doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Radoslav Kubuš**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T035 Geotechnika

Téma: Experimentální stanovení ohybové a sřihové únosnosti  
sklolaminátových kotevních tyčí  
Bending and Shear Resistance of Fiberglass Bolt Rods Set up on Trials  
Specimens

Zásady pro vypracování:

Úvod

Současný stav konstrukčních typů sklolaminátových kotevních prostředků

Návrh zkoušky experimentálního stanovení ohybové a sřihové únosnosti sklolaminátové kotevní tyče

Provedení experimentálních zkoušek

Vyhodnocení zkoušek

Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

ALDORF, J.: *Mechanika podzemních konstrukcí*. VŠB-TU Ostrava, 1999, ISBN 80-7078-695-7

HOBST, L., ZAJÍC, J.: *Kotvení do hornin. 2., dopl. vyd.*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1975, 443 s.

STILLBORG, B.: *Professional Users Handbook for Rock Bolting*. Enfield Books, 1986, ISBN-10:

HASTÍKOVÁ, A.: *Únosnost tmelených horninových svorníků*. Diplomová práce. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta stavební, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, 2013

HOLIŠ, J.: *Experimentální stanovení únosnosti tmelených svorníků*. Diplomová práce. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta stavební, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, 2014

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.**

Datum zadání: 27.02.2015

Datum odevzdání: 30.11.2015



doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.  
děkan fakulty

### **Čestné vyhlásenie študenta**

Čestne vyhlasujem, že som celú diplomovú prácu vrátane príloh vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.

V Ostrave .....

.....

Podpis študenta

Čestne vyhlasujem, že

- som bol zoznámený s tým, že na moju diplomovú prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Zb. – autorský zákon, hlavne § 35 – použitie diela v rámci občianskych a náboženských obradov, v rámci školských predstavení a použitie diela školského a §60 – školské dielo.
- beriem na vedomie, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (ďalej len VŠB-TUO) má právo bezzárobkovo ku svojej vnútornej potrebe diplomovú prácu použiť (§ 35 odst. 3).
- Súhlasím s tým, že údaje o diplomovej práci budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.
- bolo zjednané, že s VŠB-TUO, v prípade záujmu z jej strany, uzavriem licenčnú zmluvu s oprávnením použiť dielov rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bolo zjednané, že použiť svoje dielo – diplomovú prácu alebo poskytovať licenciu k jej využitiu môžem len so súhlasom VŠB-TUO, ktorá je oprávnená v takomto prípade požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB-TUO na vytvorenie diela vynaložené (až do ich skutočnej veľkosti).
- Beriem na vedomie, že odovzdaním svojej práce súhlasím so zverejnením svojej práce podľa zákona č. 111/1998 Zb., o vysokých školách a o zmene a doplnení neskorších predpisov, bez ohľadu na výsledok jej obhajoby

V Ostrave .....

.....

Podpis študenta

## **Anotácia**

Skleneným vláknom vystužené kotevné tyče, viac známe ako sklolaminátové kotevné tyče, sú v súčasnosti stále viac používané pre dočasné aj trvalé vystuženie v podzemnom stavitelstve a baníctve. Najpopulárnejšie sú tyče plného prierezu so závitom. Táto diplomová práca sa zaoberá stanoveniu strihovej únosnosti sklolaminátových kotevných tyčí. Série testov, vykonaných na kotevných prvkoch, pomôže analyzovať rôzne spôsoby porušenia, ktoré vznikajú v blízkosti svorníkovej tyče. V teoretickej časti sa nachádzajú stručné informácie o kompozitných materiáloch a o sklolaminátových kotevných prvkoch. Obsahuje spektrum používaných sklolaminátových tyčí a ich pôsobenie v masíve. V praktickej časti sú navrhnuté a následne realizované laboratórne skúšky. Výstupom je analýza pôsobenia a pracovno-deformačná charakteristika tmelenej sklolaminátovej výstuže.

**Kľúčové slová:** kompozitné materiály, sklolaminátový svorník, šmyková únosnosť tmelených svorníkov, fyzikálny model

## **Annotation**

Glass reinforced polymer bolts, commonly known as Fibre Glass rods are increasingly applied in underground building and mining for temporary or permanent use. The most common bars are fully threaded type. This diploma thesis focuses on investigation shear resistance of fibreglass bolt rods. A series of tests undertaken on anchorage rods can help to analyse a various ways of failure, which is created near the rock bolt. The theoretical part includes short in formations about composite materials and about fibreglass bolt rods. It contains spectrum of manufactured rock bolts and their function in rock massive. Practical part contains design and realisation of tests. In conclusion, analyse of shear function of rock bolt and load deformation characteristics of fibreglass bolt rod.

**Key words:** composite materials, fibreglass rock bolts, shear resistance of rock bolts, physical model

Vzor citácie:

KUBUŠ, R.: *Experimentální stanovení ohybové a střihové únosnosti sklolaminátových kotevních tyčí*, Ostrava, VŠB - TU Ostrava, 2015, 52 s.

*Pod'akovanie,*

*predovšetkým by som sa chcel pod'akovať môjmu vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Karlovi Vojtasíkovi za vedenie diplomovej práce, odborné konzultácie a pripomienky. Ďalej odborníkom z praxe Ing. Romanu Markovi, Ph. D. za cenné rady a poskytnutie materiálu ako zástupca firmy Minova Bohemia, pánu Ing. Janu Hurtovi za veľmi cennú pomoc v laboratóriách stavebných hmôt fakulty stavebnej VŠB TU Ostrava a Ing. Adamovi Janíčkovi.*

---

## OBSAH

1	ÚVOD .....	8
2	KOMPOZITNÉ MATERIÁLY .....	9
2.1	PRINCÍP KOMPOZITNÉHO PÔSO BENIA .....	9
2.2	VLÁKNOVÉ KOMPOZITY .....	10
3	KOMPOZITNÉ SKLOLAMINÁTOVÉ KOTEVNÉ TYČE .....	15
3.1	VÝROBA A BALENIE .....	15
3.2	VLASTNOSTI .....	16
3.3	MATERIÁL .....	17
3.4	DRUHY A POUŽITIE .....	18
3.5	AKO SVORNÍKY FUNGUJÚ .....	25
4	NÁVRH SKÚŠKY PRE STANOVENIE ŠMYKOVEJ ÚNOSNOSTI KOTEVNÝCH PRVKOV .....	28
5	REALIZÁCIA EXPERIMENTÁLNYCH SKÚŠOK .....	31
5.1	PRÍPRAVA SKÚŠOBNÝCH TELIES .....	31
5.2	REALIZÁCIA EXPERIMENTÁLNYCH SKÚŠOK .....	34
6	VYHODNOTENIE EXPERIMENTÁLNYCH SKÚŠOK .....	37
6.1	POROVNANIE SKÚŠOK JEDNOTNÉHO TYPU .....	37
6.2	VPLYV UHLU ŠMYKOVEJ PLOCHY NA ÚNOSNOSŤ SYSTÉMU .....	41
6.3	ZHRNUTIE VYHODNOTENIA EXPERIMENTÁLNYCH SKÚŠOK .....	46
7	ZÁVER .....	47
	POUŽITÁ LITERATÚRA A CITÁCIE .....	48
	ZOZNAM OBRÁZKOV .....	50
	ZOZNAM TABULIEK .....	51
	ZOZNAM GRAFOV .....	51
	ZOZNAM PRÍLOH .....	52

## 1 ÚVOD

V podzemnom staviteľstve a baníctve je veľmi často potrebné stabilizovať okolie inžinierskeho diela. V minulosti aj v súčasnosti je pre zaistenie dlhodobej funkcie tunelu alebo bane kľúčové správne vystuženie. Vhodnosť výstuže sa nemeria len jej schopnosťou zamedziť kovergenciam, aj keď je to kľúčový faktor. Veľmi dôležitá je taktiež časová a ekonomická náročnosť výstavby a inštalácie.

Svorníková výstuž sa postupne ukázala ako vhodná pre vystužovanie všetkých typov podzemných diel. Stala sa pri razení medzinárodným štandardom a v zrovnaní s tradičnou podpernou výstužou je jej inštalácia rýchla, účinná a ekonomicky nenáročná. Výskum a vývoj svorníkovej výstuže prebiehal v každej banícky vyspelej krajine. Od pôvodných verzií svorníkov, ktorými boli drevené tyče, sa spoločnosť obrátila k svorníkom oceľovým, ktoré sa v hodnej miere používajú dodnes. Doba železa ako svorníkovej výstuže však pomaly ustupuje moderným kompozitným materiálom. Sklolaminát je trvácny, ľahký, únosný a pri nízkej hmotnosti aj ekonomicky nenáročný.

Cieľom diplomovej práce je experimentálne stanovenie únosnosti práve sklolaminátových kotevných tyčí. Strihová únosnosť je pre sklolaminátový svorník podstatná. Na jednej strane je žiaduca nízka únosnosť tyče v strihu z dôvodu ľahkej deštrukcie rozpojovacími prostriedkami. Na druhej strane však prvok, ktorý je trvalo zabudovaný, môže aj pomocou šmykovej únosnosti predniesť napätia, ktoré by za iných okolností mohli spôsobiť kolaps.

Pre vytvorenie detailnejšieho pohľadu na sklolaminátovú svorníkovú výstuž je potrebné bližšie predstaviť terminológiu a systém kompozitných materiálov. V praxi sa pre bežné vystužovanie používajú hlavne svorníkové tyče plného prierezu. V práci sú však predstavené rôzne druhy kompozitných výrobkov učených na vystužovanie zemín a hornín. Práca bližšie zoznamuje aj s pôsobením svorníku v horninovom masíve.

Laboratórne testy sa realizovali na svorníku ROCKBOLT priemeru 25 mm s plným závitom. Skúška sa pripravila tak, aby čo najviac pripomínala pôsobenie tyče v reálnom prostredí. Ako kotviaca zmes sa použila organicko-minerálna živica ROCKBOLT.

Výskum svorníkov nadväzuje na diplomové práce *Únosnost tmelených horninových svorníků* od Ing. Alice Hastíkovej a *Experimentální stanovení únosnosti tmelených svorníků* od Ing. Jaroslava Holíša.



## 2 KOMPOZITNÉ MATERIÁLY

Od doby, keď ľudstvo začalo vyrábať umelé predmety, bolo potrebné voliť najvhodnejší materiál. Začiatky siahajú od výberu najvhodnejšieho kameňa pre sekery, či najpevnejšieho dreva pre luky. Mechanické vlastnosti boli rozhodujúce pre voľbu materiálu no pri rozvoji technológii sa zvyšoval význam aj ďalších vlastností.

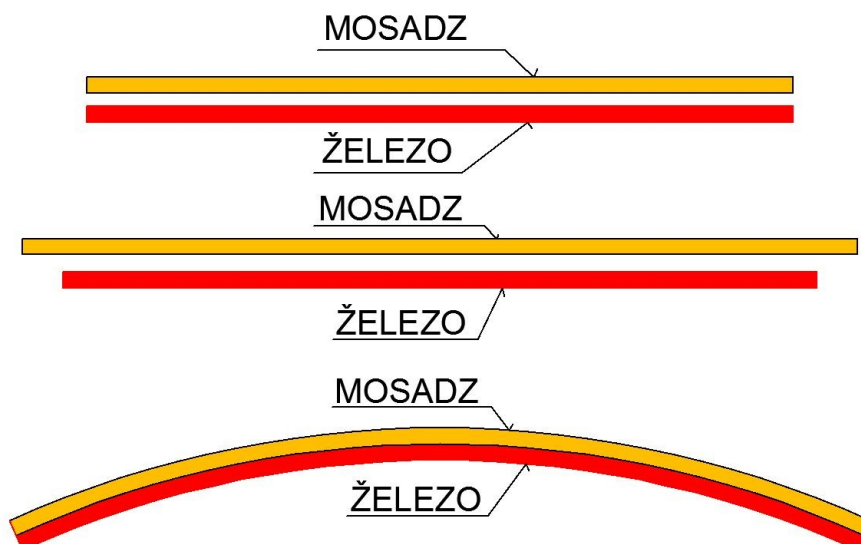
*Kompozitné materiály (kompozity) sú zložené materiály, skladajúce sa z dvoch alebo viacej zložiek, z ktorých každá plní inú špecifickú funkciu a ma iné materiálové vlastnosti, väčšinou značne odlišné.[04]*

Veľká miera kompozitných materiálov sú konštrukčné. Skladajú sa z nosnej časti, výstuže a z matrice, ktorá ma spojujúcu funkciu. Výstuž pritom predstavuje väčšinou diskontinuálnu zložku kompozitu, kde sa z jedného miesta výstuže na druhé nedostaneme v rámci danej zložky, ale musíme ísť cez matricu. Matrica je naopak kontinuálnou zložkou kompozitného materiálu. Typickým príkladom sú vláknové kompozity s tenkými vláknami ako nosnou časťou.

Vhodnou kombináciou zložiek s využitím príslušných výrobných technológií je možné vytvoriť nehomogénnu anizotropnú materiálovú štruktúru, ktorá odpovedá deformačným a pevnostným požiadavkám na príslušné teleso. Pri porovnaní s klasickými kovovými materiálmi je možné zvýšiť mechanické, chemické, elektrické vlastnosti ako aj redukovať hmotnosť. Na druhej strane je nevýhodou zväčša komplikovanejšia výrobná technológia, vyššia výrobná cena a možná prítomnosť zvyškových napätí z titulu výrobnéj technológie a pod.

### 2.1 PRINCÍP KOMPOZITNÉHO PÔSOBENIA

Klasický a základný príklad kompozitného pôsobenia je známy bimetalický článok, ktorý sa uplatňuje hlavne pri termostatickej kontrole ako súčasť termostatu. Článok je vyrobený z dvoch pásov rozdielnych kovov spojených pevne k sebe. Materiálom môže byť napríklad mosadz a železo. Pri zmene teploty je časť s väčším súčiniteľom tepelnej rozťažnosti (mosadzná časť) viac namáhaná tlakom. Je to z dôvodu zachovania rovnakých pretvorení. Železná časť je namáhaná ťahom. Článok sa ohýba spoločne. Kompozitným (synergickým) účinkom získava systém nové vlastnosti pri zmenách teploty. Ohyb tohto článku sa dá využiť pre reguláciu teploty v spojení s vhodným snímačom. Príklad systému je na obrázku 1.



Obr. 1: Princíp demonštrovaný na bimetalickom článku [02]

## 2.2 VLÁKNOVÉ KOMPOZITY

Vláknové kompozitné materiály sú umelé materiály, pozostávajúce z vláknovej výstuže a plastickej matrice. Synergické spolupôsobenie pevných a tuhých vlákien s poddajnou alebo krehkou matricou umožňuje konštruovať kompozitné výrobky s vysokou pevnosťou, tuhosťou a húževnatosťou, presahujúcou všetko, čo bolo skôr dosiahnuté úpravou tradičných materiálov. Preto je pozornosť venovaná týmto druhom kompozitných materiálov tak vysoká. Bez ich existencie by bol ďalší pokrok v technike, hlavne v leteckom, kozmickom a automobilovom priemysle nerealizovateľný. Najvyššieho potenciálu sa dosiahne, ak sú vlákna namáhané až do medze pevnosti napätím prenášaným matricou. Matrice teda slúžia predovšetkým k prenosu napätia do vlákien, ktoré naopak prenášajú väčšinu pevnosti kompozitu. Matrice však slúžia aj pre spojenie vlákien do vhodnej štruktúry a chráni ich pred povrchovými vplyvmi.

Vzhľadom nato, že vlákna majú v týchto druhoch kompozitov prevažujúcu úlohu, je potrebné sa o ne podrobnejšie zaujímať.

### 2.2.1 Vlákna

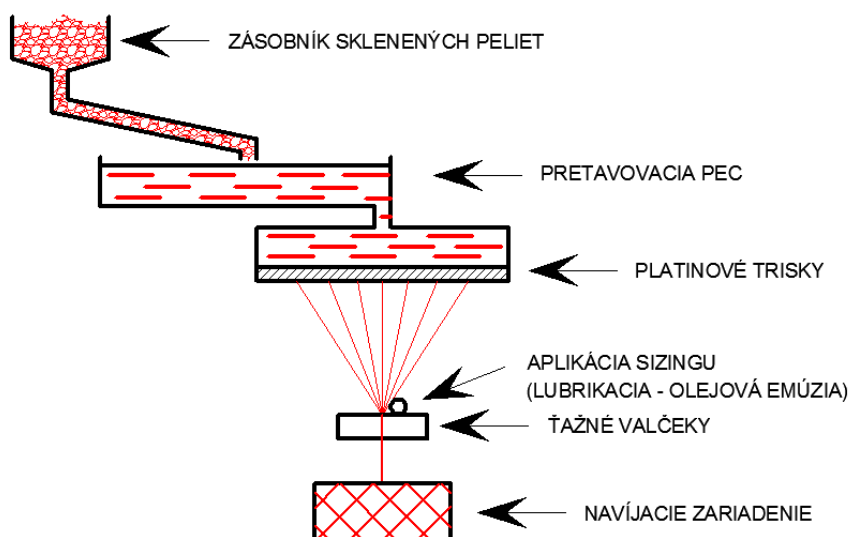
Vlákna utvárajú nosnú štruktúru kompozitných materiálov. Pre vystužovanie kompozitov je k dispozícii široké spektrum vlákien, ktoré sa stále rozširuje. Vedľa prírodných vlákien ako bavlna alebo celulóza sú vlákna kovové, zliatinové, polykryštalické vlákna

z rôznych keramických materiálov, sklenené a minerálne vlákna aj vlákna polymérne. Táto práca sa orientuje na vlákna sklenené.

Základné vlastnosti sklenených vlákien sú:

- Hustota okolo  $2,5 \text{ g/cm}^3$
- Tuhosť cca  $1/3$  tuhosti oceli  $E = 80 - 100 \text{ GPa}$
- Malá odolnosť proti únave
- Tepelná vodivosť o polovicu nižšia ako oceľ
- Tepelná rozťažnosť je menej ako polovica tepelnej rozťažnosti oceli

Väčšina sklenených vlákien sa vyrába rýchlym ťahaním z taveniny (až 400 m za minútu) a tak je štruktúra fixovaná za asi  $10^{-5} \text{ s}$ . Schéma výroby sklenených vlákien je na obrázku 2. Obvyklé priemery sú od 3,5 do 20 mikrometra. Na zvlákňovanie má dôležitý vplyv viskozita a rýchlosť zmeny viskozity s teplotou. Oboje tieto vlastnosti závisia na chemickom zložení skla. Štruktúra skla nie je definovaná iba chemickým zložením. Ďalším dôležitým faktorom je teplotná história. Na jeden krát je ťahaných od 50 do 400 vlákien, ktoré vytvárajú pramene, ktoré sú základnou jednotkou pre ďalšie výrobky.



Obr. 2: Výroba sklenených vlákien [01]

Jednotlivé vlákna na seba pôsobia silno abrazívne, čím sa značne degraduje ich pôvodná pevnosť. Preto je každé vlákno ešte pred vytváraním prameňa lubrikované. Je potiahnuté mikrotenkou ochrannou vrstvou, ktorá môže byť buď dočasná alebo trvalá.

Rovnoběžne zoskupené pramene vytvárajú povrazce. Počet prameňov v povrazci je 12 až 120, obvyčajne však 60. Povrazce sa používajú pre priame vystužovanie výrobkov ako napríklad trúbiek a nádrží, k výrobe vystužujúcich tyčí alebo k príprave sekaného vlákna. Keď sú pramene náhodne ukladané do roviny tak, aby bolo dosiahnuté rovnakej distribúcie v oboch smeroch a následne prešité, vznikajú netkané rohože. Rohože môžu byť však vyrábané aj z tenších povrazcov, napr. 30 vláknami.

Väčšina sklenených vlákien sa vyrába z tzv. E-skla s vysokým elektrickým odporom a dobrými tvárnymi charakteristikami. Vlákná z E-skla majú slabú chemickú odolnosť proti kyselinám aj alkáliám, ale dobre odolávajú vode a  $\text{CaCl}_2$ . Vlákná sa ďalej vyrábajú z tzv. A-skla (používaného pre fľaše alebo okná), C-skla (tzv. Chemické sklo so zvýšenou odolnosťou proti kyselinám), D-skla (s nízkou dielektrickou konštantou), S-skla alebo R-skla (s vyššou pevnosťou a modulom a s nižším poklesom mechanických vlastností pri rastúcej teplote). Mechanické vlastnosti niektorých vyrábaných vlákien sú uvedené v tabuľke 1.

Názov	Modul pružnosti v ťahu $E_t$ [GPa]	Pevnosť v ťahu $\sigma_{Pt}$ [MPa]	Hustota $P$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	Merná pevnosť $\sigma_{Pt}/\rho$ [MPa/kg.m <sup>-3</sup> ]	Ťažnosť $\varepsilon_{f,krit}$ [%]
Sklo – E	72,4	3500	2540	1,38	2,5
Sklo – S	85,5	4600	2480	1,85	2,5
Grafit – E	390	2100	1900	1,1	0,7
Grafit – S	240	2500	1900	1,3	0,7
Bor	385	2800	2630	1,1	0,8
Volfrám	414	4200	1930	0,22	
Aramid Kevlar 49	130	2800	1500	1,87	2,5
Azbest	160	3100	2560	1,21	1,9
Karbid kremičitý	250	2200	2600	0,85	0,9
Polyetylen PE	172	3000	970	3,09	1,7
Oceľ	210	340-2500	7800	0,0440-0,321	

Tab. 1: Mechanické vlastnosti vybraných vlákien[04]

### 2.2.2 Matrice

Spôsob prípravy a výroby, druh vlákien a ich povrchová úprava, vlastnosti a využiteľnosť i oblasť aplikácie vláknových kompozitov, sa líši podľa typu použitej matrice. Hlavnou úlohou matrice je zaistenie celistvosti kompozitného telesa. Pri návrhu kompozitných materiálov sa berie ohľad nielen na namáhanie výrobku, ale aj na podmienky, v ktorých bude využívaný. Pri výrobe sa uplatňujú mnohé variácie typu vlákien a matrice,

priemeru vlákien alebo rôznych výrobných postupov. Kombinácia sa volí podľa namáhania prvku a podľa teploty alebo vlhkosti prostredia, v ktorom bude kompozit pôsobiť. Vo všetkých prípadoch je nutné určovať vlastnosti kompozitov tak, aby bolo dosiahnuté ich synergické pôsobenie a dosiahnutá požadovaná životnosť. Materiál matrice býva rôzny. Na trhu sú výrobky z kovových, keramických a sklenených matric, silikátových i polymérnych. Materiál musí byť v súlade s výstužou pre dosiahnutie optimálnych vlastností celého kompozitu. Obecnou mechanickou požiadavkou na matricu je výborná adhézia k výstuži a dobrá medzná ťažnosť.

Špecifické funkcie matrice je možné vyjadriť v niekoľkých bodoch:

- Spája vlákna v kompaktný celok
- Sprostredkuje zaťaženie vlákien v miestach vonkajšieho zaťaženia, v miestach prerušených vlákien, premostňuje trhliny vo vláknach a pod.
- Vytvára vonkajší funkčný povrch telesa a estetický vzhľad vrátane farby

Vláknové kompozity s organickou polymérnou matricou majú najdlhšiu tradíciu. Prvý patent sa datuje do roku 1916. Jednotlivé polyméry sa navzájom líšia podľa vlastností, výrobného postupu, ale aj podľa toho či je polymér termoplast alebo reaktoplast.

Termoplasty sú po vytvrdnutí tuhé látky, ktoré mäknú a tečú pri zvýšení teploty nad teplotu kritickú. Po ochladnutí opäť stuhnú. Ak sa pre matricu použijú termoplastové polyméry, môže sa značne zredukovať cena. Úspory sú dane predovšetkým ľahšou výrobou aj zložitejších tvarov. Najčastejšie používané pre vystužovanie vláknami sú polyamidy, polyetylén, polypropylén, polykarbonát, styrén a podobne. K vystužovaniu sú vhodné vlákna sklenené, uhlíkové a aramidové alebo ich kombinácia. Vlastnosti kompozitov z termoplastov veľmi závisia na výrobnom postupe, pevnosti a na iných vlastnostiach vlákien. Napríklad vložením 40 % sklenených vlákien do polyamidu môžeme zvýšiť pevnosť asi 3-krát a modul pružnosti asi 8-krát. Mechanické vlastnosti vybraných termoplastov sú uvedené v tabuľke 2.

Názov	Hustota $P$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	Modul pružnosti v ťahu $E_t$ [GPa]	Pevnosť v ťahu $\sigma_{Pt}$ [MPa]	Ťažnosť $\epsilon_{f,krit}$ [%]
<b>Polypropylén</b>	900	1,1-1,5	28-41	10-700
<b>Polyamid</b>	1420	2,4-2,8	76-83	60-300
<b>Polykarbonát</b>	1210	2,1-2,8	62-76	110-130
<b>Polyether</b>	1310	3,8	70	50-130

Tab. 2: Mechanické vlastnosti vybraných termoplasty[04]

Reaktoplasty vystužené vláknami sú jednoznačne najrozšírenejšie konštrukčné kompozity. Od prvých sklenených laminátov v roku 1941 dnes zasahujú do všetkých odvetví priemyslu so širokým spektrom matric, výstuží, spôsobov výroby a vlastností. Pre matrice sú najrozšírenejšie polyesterové, epoxidové, fenolické a siloxylové živice. Základnou vlastnosťou je skutočnosť, že zostávajú v tuhej fáze aj po zahriati, čo zvyšuje ich odolnosť proti vyšším teplotám. Vlákná môžu byť organizované usporiadané rozmanitým spôsobom alebo náhodné orientované. Až 90% všetkých reaktoplastových kompozitov obsahuje sklenené vlákna. Po vláknach sklenených sa uplatňujú vlákna uhlíkové, keramické, kovové aramidové alebo ich kombinácia. Najvyššieho spevnenia je dosiahnuté pri hmotnostnom podiele vlákien 70 až 80 %.Mechanické vlastnosti u typických reaktoplastov sú uvedené v tabuľke 3.

Názov	Hustota $P$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	Modul pružnosti v ťahu $E_t$ [GPa]	Pevnosť v ťahu $\sigma_{Pt}$ [MPa]	Ťažnosť $\epsilon_{f,krit}$ [%]
<b>Epoxidová živica</b>	1100-1400	2,1-6,0	35-90	1-10
<b>Polyestery</b>	1100-1500	1,3-4,5	45-85	1-5
<b>Fenolické živice</b>	1300	4,4	50-60	1-3
<b>Polyimidy (až do 350 °C)</b>	1200-1900	3,0-3,1	80-190	2-40

Tab. 3: Mechanické vlastnosti vybraných reaktoplastov [04]

Epoxidy sa vyznačujú vynikajúcimi mechanickými a elektrickými vlastnosťami a bežne sa používajú s vysokým vystužením, napríklad uhlíkovými alebo sklenenými vláknami. Majú dobré elektroizolačné vlastnosti v širokej oblasti teplôt, veľmi cenená je aj ich značná odolnosť proti vode, roztokom alkálií aj kyselín a niektorým rozpúšťadlám.

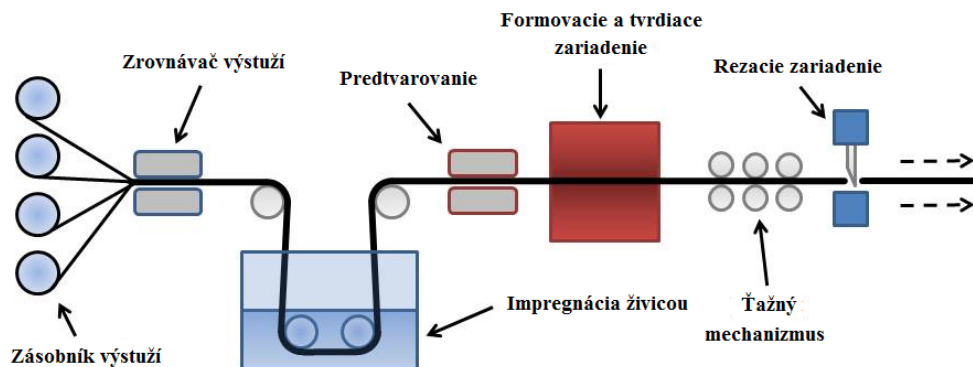
### 3 KOMPOZITNÉ SKLOLAMINÁTOVÉ KOTEVNÉ TYČE

Ako kotevné prvky sa v stredoveku používali drevené svorníky a klíny. V minulom storočí boli však vystriedané skoro výhradne oceľovými typmi kotevných prvkov. Išlo o tyče, trubky aj laná. Oceľ plnila po dekády dôležitú úlohu pri kotvení v podzemnom staviteľstve, baníctve aj pri kotvení pozemných konštrukcií. Časom sa však vyvinula potreba alternatívneho materiálu využiteľného na tieto účely. Veľmi vhodnou alternatívou sa zdajú byť kompozitné materiály, ktoré spĺňajú náročné požiadavky na pevnosť aj trvácnosť. Medzi najvýznamnejšie a v smeroch kotvenia najpoužívanejšie patria polyméry vystužené sklenenými vláknami. Tento materiál je používaný v mnohých smeroch. Napríklad v elektronike alebo pri budovaní lodí alebo všade tam, kde je potrebný ľahký, silný a trvácny materiál. V súčasnosti sa s obľubou začali používať sklolaminátové kotevné prvky, ktoré dokážu zastúpiť a v mnohých smeroch aj prekonať svoje oceľové alternatívy.

#### 3.1 VÝROBA A BALENIE

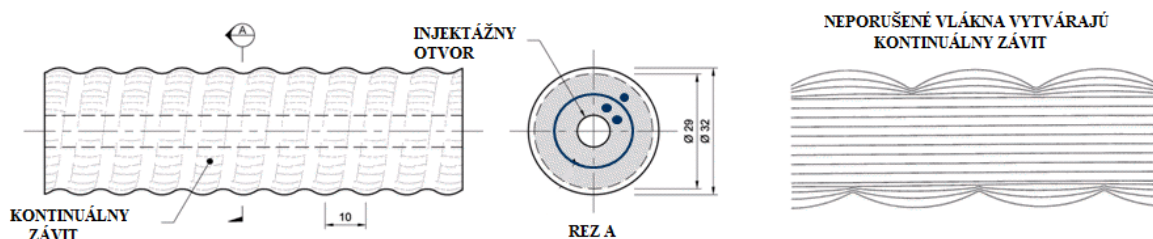
Existujú dve hlavné metódy výroby kompozitných materiálov a to buď zalievanie vo formách alebo pultrúziou. Metóda spomenutá ako druhá v poradí bola vyvinutá pre výrobu rôznych kompozitných profilov, ktoré sú vystužené spojitými vláknami. Je to patentovaný proces, kde je možné kontinuálne vytváranie sklolaminátových prvkov. Spojité vlákna s vysokou pevnosťou sú impregnované. Vedú cez ponorný valec do vane so živicom a následne sú preťahované cez profilovacie zariadenie, kde prierez nadobudne konečný geometrický tvar. Súčasne prebehne proces stvrdnutia. Tvrdenie prebieha kontinuálne pri teplotách v rozmedzí 100 až 200 °C. Vytvrdnutý profil sa následne môže rozrezať na ľubovoľne dlhé diely potrebné pre transport. Ak ide o tenký profil, je možné baliť profily do rolí, ktoré dosahujú dĺžku až viac ako 50 m. Celý proces sa udržiava v chode pomocou ťažného zariadenia, ktoré nepretržite ťahá vytvrdnutý profil spolu s privádzanými vláknami. Táto metóda je plne automatizovaná a veľmi produktívna. K pultrúzií sa dá použiť široké spektrum živíc. Do živíc je možné pridávať plnivá, farbivá a rôzne prísady pre zlepšovanie vlastností. Touto technológiou je možné vyrábať cenovo výhodné kompozitné profily. Kvalita kompozitov zhotovených za vysokej teploty vytvrdzovania a pri konštantných podmienkach, značne prevyšuje ručne skladané a za studena tvrdené kompozity. Tento výrobný proces dovoľuje výrobu prierezu mnohých tvarov a prierezov, rýchlosť spracovania dosahuje rýchlosti až 150 cm/min. Schéma pultrúznej linky je zobrazená na obrázku 3.





Obr. 3: Schéma pultrúznej linky [01]

Kotevné tyče na bázy sklolaminátov, vyrábané v moderných fabrikách, sú často opatrené kontinuálnym závitom po celej svojej dĺžke. Závit slúži na zlepšenie súdržnosti a lepší prenos síl na kontakte tyč - lepiaca zmes, ale taktiež na uľahčenie nasadenia hlavy kotvy. Dnes existujú 2 najznámejšie spôsoby výroby závit. Lacnejší a technologicky nevyhovujúci spôsob, je rezanie závit. Pri tomto spôsobe však dochádza k porušeniu nosných vlákien v krajných vrstvách namáhanej kotvy. Ďalší spôsob, ktorý eliminuje nedostatky prvého spôsobu, je princíp na báze rotujúceho oka, ktorý je vytváraný riadeným prítlakom. Pri tomto spôsobe sa vlákna neporušia. Schematické znázornenie je na obrázku 4.



Obr. 4: Znáznornenie nerezaného závit[13]

### 3.2 VLASTNOSTI

Medzi prvé a najdôležitejšie vlastnosti, ktorými sa tieto materiály odlišujú od oceli je vysoká odolnosť proti korózií a obecné chemickým vplyvom. Dlhodobá stálosť, ktorou sa používané syntetické materiály vyznačujú, im dovoľuje uplatnenie aj u stavieb s dlhou životnosťou. Ďalšou, nemenej výraznou charakteristikou je výrazný rozdiel medzi ťahovou a strihovou únosnosťou prvku. Je to materiál s výrazne anizotropnými vlastnosťami, kde prírodným príkladom môže byť drevo, ktoré ma taktiež výrazne odlišné vlastnosti v smere vlákien a kolmo na ne. Nízka strihová únosnosť je žiaduca v prípadoch, keď je nutná deštrukcia kotiev. Je to napríklad v prípade spevňovania čelby razeného diela, výstuží delenej



kaloty razeného tunelu, spevňovania plôch následne dobývaného nerastu a podobne. Syntetické kotevné prvky môžeme používať dlhodobo. Príkladom môže byť použitie sklolaminátových kotiev ako súčasť vonkajšieho ostenia tunela razeného novou rakúskou tunelovacou metódou bez obmedzenia statického pôsobenia. Rovnako si tieto kompozitné prvky nájdu uplatnenie pre dočasné spevnenie s následnou deštrukciou s technológiou razby tunelu.

Ďalšou vlastnosťou, ktorú je nutné spomenúť, je vysoká pružnosť tyčových a trubkových profilov umožňujúca ich ohýbanie aj v nízkych polomeroch. To umožňuje jednoduchú manipuláciu aj s dlhšími prvkami v obmedzenom priestore, čo predstavuje nemalú výhodu v podzemnom staviteľstve aj v baníctve. Syntetické kotviace prvky majú výrazne nižšiu hmotnosť oproti odpovedajúcim oceľovým prvkom, čo je výhodou predovšetkým pre transport a manipuláciu a samozrejme to má dopad aj na celkovú cenovú náročnosť projektu.

### 3.3 MATERIÁL

Ak ide o vlastný materiál kotevných prvkov, predovšetkým sa používajú lamináty, zostávajúce zo sklenených vlákien a epoxidovej alebo polyesterovej živice. Podiel sklenených vlákien je od 70 do 75 % celkovej váhy prvku. Tuhosť a tvrdosť je definovaná množstvom a orientáciou vlákien. V sklolaminátových kotvách sú vlákna orientované lineárne, čo má za výsledok vysokú pevnosť v smere vlákien. V niektorých prípadoch, zvlášť ak je požadovaná vysoká únosnosť kotevných systémov, sa ako výstuž používa aj laminát na báze syntetických vlákien ako kevlar, grafit, karbón. Syntetické vlákna taktiež umožňujú dlhodobé nasadenie s cementovým tmelom, ktorý spôsobuje skleneným vláknam koróziu. Pre konštrukciu operných hlavíc, ktoré podopierajú podložku, respektíve dokážu kotve udeliť predpätie, sa používa veľmi pevných sklolaminátov poprípade sa používajú kovové prvky.

Syntetické sklolaminátové kotvy sa používajú väčšinou ako kotvené po celej dĺžke vývrtu. Používajú sa tmele na základe cementovej malty alebo syntetických živíc. Pri kotvení je veľmi dôležitá adhézia medzi samotnou kotevnou tyčou a kotviacim tmelom. Pri pôvodných hladkých sklolaminátoch bol tento faktor, najmä u cementových mált, nedostatočný. Konštruktéri preto používali rôzne spôsoby, aby dosiahli vytvorenie žiaducich nerovností, napríklad rebierka alebo točený závit. Tento krok u niektorých laminátov viedol k zníženiu ťahovej pevnosti prvku. Vysoké adhézie sa dosahujú aj použitím prameňových

a kombinovaných kotiev, ktoré pozostávajú z niekoľkých ťahových prvkov spojených priečnymi spojkami.

Ďalšou oblasťou je konštrukcia dostatočne únosnej opernej hlavy vyčnievajúceho konca svorníku. Únosnosť hlavice by mala umožniť využitie vysokej ťahovej únosnosti samotného kotevného prvku, poprípade umožniť ich predpätie. Najviac sa osvedčili klinové kužeľové hlavice s objímkou, roznášajúce zaťaženie na istú dĺžku kotvy, spravidla 10 – 15 cm. Súčasné konštrukcie hlavíc prenášajú 30 – 50 % únosnosti kotevných prvkov. Vzhľadom nato, že sa syntetické kotvy používajú hlavne ako kotvené po celej dĺžke, bola by požiadavka na plnú únosnosť neopodstatnená.

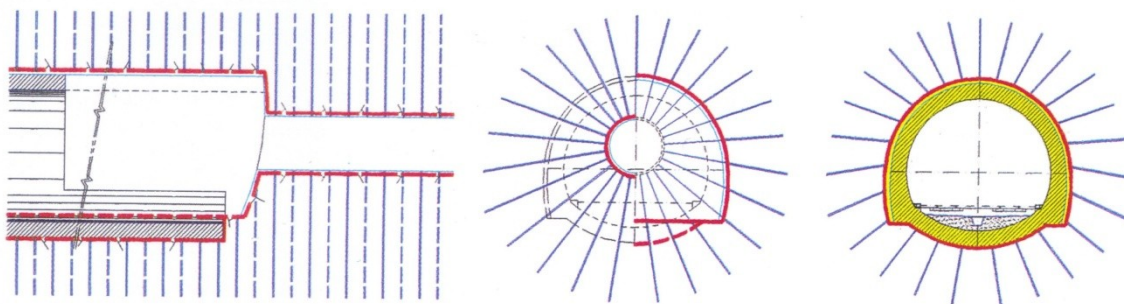
### 3.4 DRUHY A POUŽITIE

Na základe vlastností a spôsobu použitia je možné syntetické kotevné prvky rozdeliť do niekoľkých skupín. Najjednoduchším typom sú lepené svorníky, ukotvené pomocou ampúl so syntetickým tmelom, alebo pomocou cementovej malty čerpanej do vrtu. Typické prierezy sú zobrazené na obrázku 5. Ide predovšetkým o sklolaminátový kompozit s obsahom sklenených vlákien približne 75 % váhy prvku. Medza pevnosti v ťahu dosahuje pri kruhových priemeroch od 5,5 mm do 25 mm pevnosti od 15 až do 120 kN. Pre špeciálne Y-profilu sú pevnosti rádovo vyššie a to od 350 až 500 kN. Len pre zrovnanie, pri nahradení sklenených vlákien karbónovými, je pevnosť tyče o priemere 16 mm už 450 kN oproti cca 180 kN pri použití vlákien sklenených. Únosnosť hlavíc na medzi porušení materiálu je pri rezaných závitoch 50 až 120 kN a pri použití klinových hlavíc a oceľových objímiek až 180 kN.

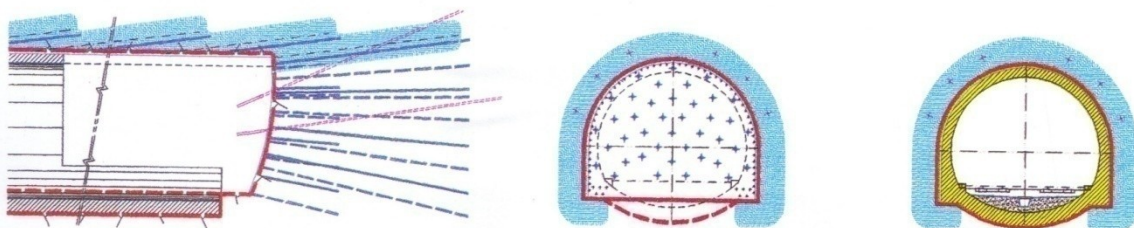


*Obr. 5: Niektoré prierezy kotevných tyčí[13]*

Typické použitia sú znázornené na obrázku 6, na príklade vystužovania prieskumnej štôlne razenej v profile budúceho tunelu. Ďalšie je na obrázku 7, kde je použitie pri vystužovaní čelby budúceho tunelu. Známe je aj použitie sklolaminátových kotevných tyčí pri zaistení strmých svahov a násypov elektrifikovaných tratí, kde bludné prúdy spôsobujú rýchlu koróziu oceľových prvkov.



*Obr. 6: Vystužovanie prieskumnej štôlne[13]*



*Obr. 7: Vystuženie čelby tunelu[13]*

Ďalším používaným typom sú injektážne svorníky, čo sú v podstate hrubostenné trúbky s profilovaným povrchom. Vnútorňý priestor je určený k transportu injektčného média na dno vývrtu, odkiaľ je vyplňovaný priestor vnútri resp. je realizovaná injektáž okolitého prostredia. Tvary a typy sú spravidla odvodené od lepených svorníkov. Príklad injektážneho svorníku je uvedený na obrázku 5 vyššie. Priemery vnútorného otvoru sa pohybujú od 8 do 17 mm pri vonkajšom priemere od 22 do 27 mm. Únosnosť týchto prvkov je od 250 do 380 kN. Príklad použitia svorníku zainjektovaného polyuretánovou živicom je zobrazený na obrázku 8.



*Obr. 8: Príklad použitia injektážneho svorníku[13]*

Výrobcovia ponúkajú niektoré injektážne svorníky aj ako samozávrtné. Tieto tvoria spolu s príslušenstvom ucelený systém. Základným prvkom je nastaviteľná samozávrtná tyč. Pri tomto druhu kotvenia sa tyče používajú ako stratené vrtné sútyčie. Tyče zostávajú po zavrtaní na mieste a následne sú zainjektované polyuretánovou živcou. Použitie nájdú v podmienkach porušených a nestabilných hornín, zhotovenie vrtných mikropilót aj zachytenie nestabilných svahov. Celý systém funguje v troch fázach. V prvej fáze plní tyč funkciu vrtnej tyče. V druhej pôsobí kotevná tyč ako injektážna trúbka a v tretej fáze, po vytvrdnutí injektážneho média, pôsobí tyč ako lepená kotva. Vzhľadom k mechanickým vlastnostiam sklolaminátových kompozitných prvkov je prenos krútiaceho momentu obmedzená. Týmto faktorom je teda obmedzená aj dĺžka vývrtu, ktorá je v porovnaní s oceľou nižšia. Použitie samozávrtných kotiev je podobné ako v prípade lepených kotiev a to spevňovanie hornín v okolí razených podzemných diel. Injektážne prvky sa používajú predovšetkým v podmienkach slabých, porušených a zvetraných horninách. Príklad samozávrtného svorníku je na obrázku 9.

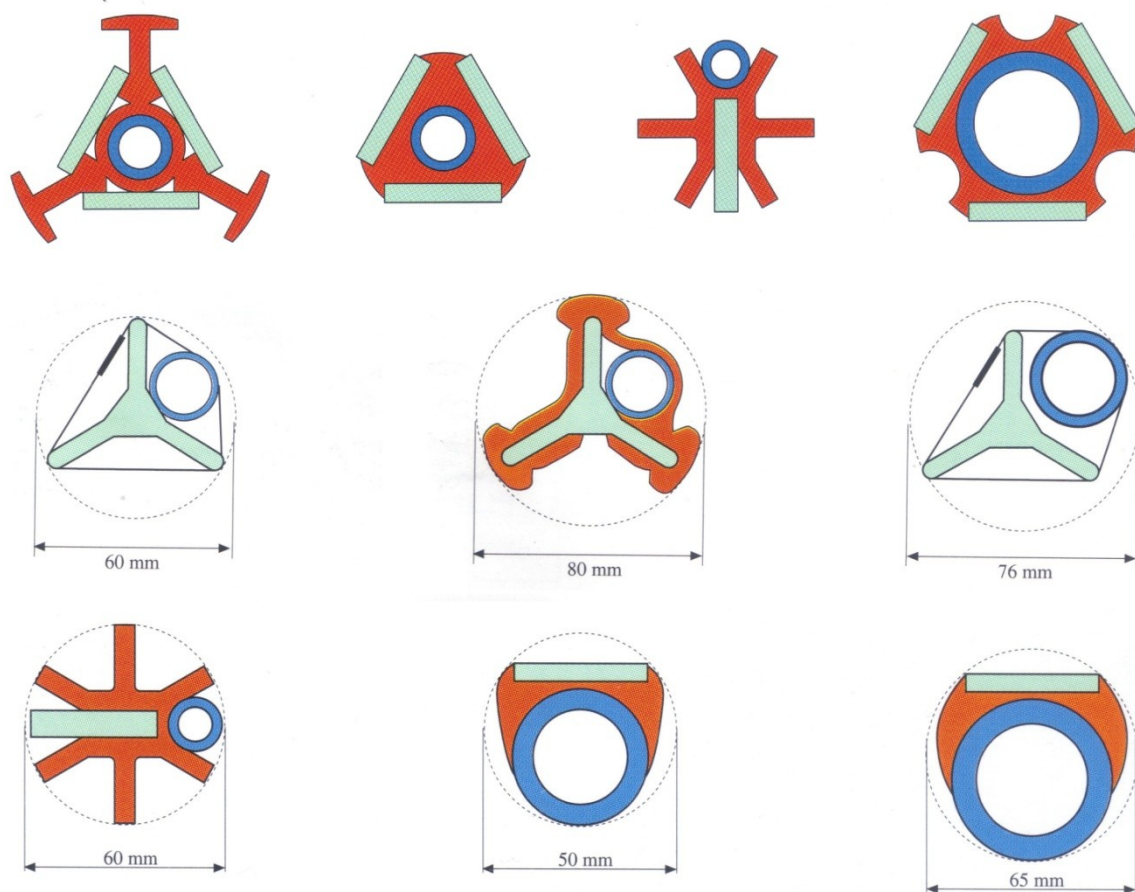




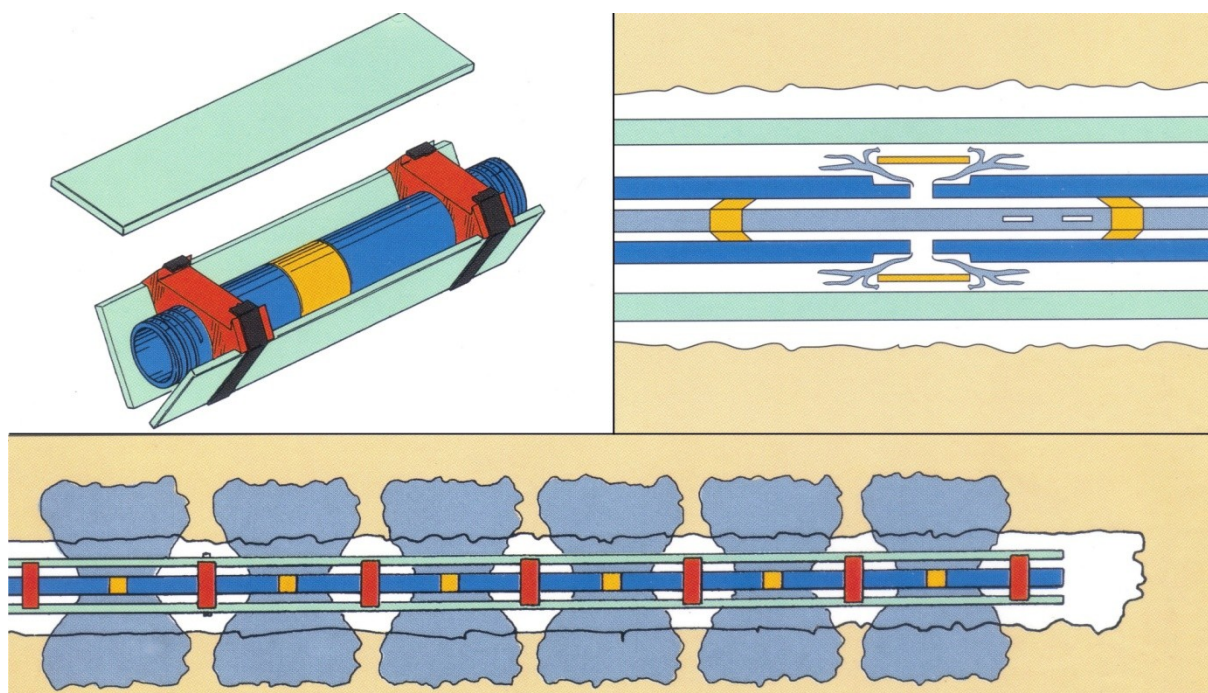
*Obr. 9: Samozávrtný svorník s hrotom[13]*

Lanové a kombinované kotvy sú ďalším príkladom uplatnenia kompozitných materiálov v praxi. Sú zostavené z niekoľkých prvkov, ktoré navzájom spolupracujú. Sú určené pre zemné i skalné prostredie. Pre aplikácie trvalé aj dočasné.

Kombinované kotvy zo syntetických materiálov v sebe spájajú vysokú ťahovú pevnosť kotevných prvkov a vysokotlakovú injektáž masívu. Pri tejto kombinácii ide vlastne o zväzok ťahových prvkov s injektážnou trúbkou, ktorá umožňuje injektáž po celej dĺžke vývrtu. Spektrum vyrábaných ako aj používaných prvkov umožňuje kombinácie rôznych počtov a tvarov prvkov, tak isto ako realizáciu injektáže buď z dna alebo od hlavy vývrtu. Ako možnosť taktiež pripadá injektáž po celej dĺžke pomocou ventilov, rozmiestnených po dĺžke injektážnej trúbky. Únosnosť týchto prvkov je značne variabilná a pri vhodnej kombinácii dosahuje veľmi vysokých hodnôt, ktoré dosahujú cez 1100 kN. Zmenou počtu profilov rôznych prierezov sa môže vždy dosiahnuť ideálnej zostavy pre danú situáciu. Rôzne varianty kombinovaných kotiev sú na obrázku 10. Schéma injektážnej zostavy je zobrazená na obrázku 11. Pri použití vláknovej výstuže ako je karbón alebo grafit, je možné konštruovať kotvy s ešte vyššou únosnosťou. Použitie si kombinované sklolaminátové kotvy nájdu rôzne. Typickým použitím je vystužovanie štôlní a tunelov, stabilizácia svahov a násypov. Sklolaminátovými prameňovými kotvami môžeme nahradiť klasické oceľové káblivé kotvy pre kotvenie svahov, zárezov, stavebných jám a pozemných konštrukcií.



Obr. 10: Vybrané varianty kombinovaných kotiev[13]



Obr. 11: Schéma injektážnej zostavy[13]



Niektoré ďalšie použitia z praxe ukazujú aj obrázky 12 až 15



*Obr. 12: Montáž kotvy z jednotlivých prvkov[13]*



*Obr. 13: Vkladanie kotvy do vývrtu v čelbe[13]*





*Obr. 14: Transport materiálu v roliach[13]*



*Obr. 15: Pripravené kotevné prvky[13]*



Celkovo môžeme stručne zhrnúť výhody používaných syntetických kotevných prvkov aj v zrovnaní s oceľovými kotvami nasledovne:

- Približne 1,4x vyššia ťahová únosnosť sklolaminátových prvkov oproti prvkom oceľovým
- Hmotnosť sklolaminátových prvkov predstavuje necelých 25% hmotnosti zodpovedajúcim oceľovým prvkom
- Polomer zakrivenia pri pružnom ohybe je u syntetických kotiev približne 10x menší. Napríklad sklolaminátová tyč priemeru 25 mm ma tento polomer približne 3m.
- Sklolaminátové prvky sú ľahko zničiteľné rozspojovacími orgánmi raziacich a dobývajúcich strojov
- Syntetické kompozity nepodliehajú korózií a sú odolné voči chemickým vplyvom
- Možnosť zvýšenia kontaktnej plochy vhodnou kombináciou prvkov
- Možnosť vysokotlakovej chemickej alebo cementovej iniektáže
- Možnosť mať dĺžky kotiev viac ako 50 m

Je nutné spomenúť aj nevýhody týchto prvkov:

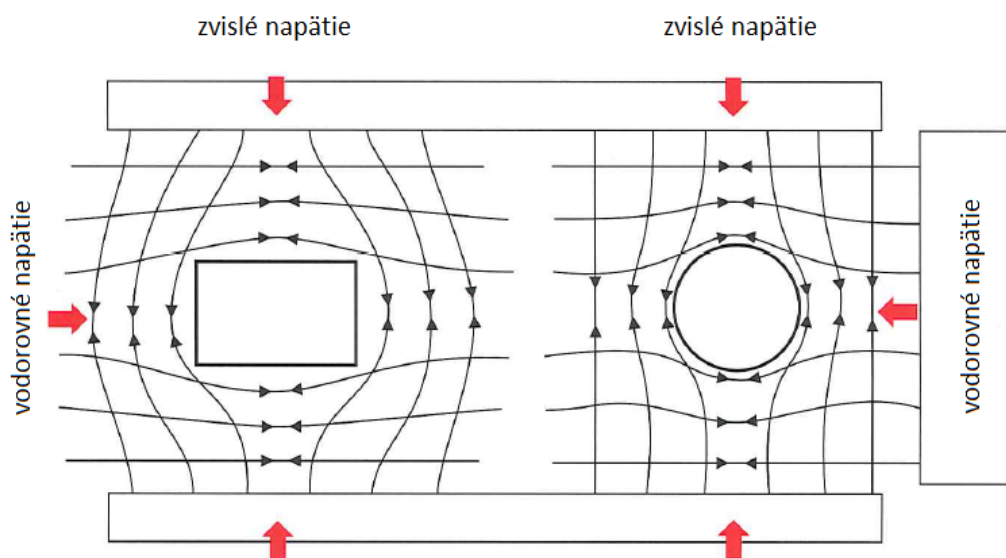
- Nižšia pevnosť koncových hlavíc svorníkov v porovnaní s únosnosťou samotného prvku
- Náročná realizácia skúšok pevnosti ukotvenia
- Náročný a komplikovaný spôsob predpätia svorníku
- Vyššia cena syntetických kotevných prvkov, ktorá je asi o 10 až 30 % vyššia v porovnaní s oceľou, avšak nižšia ako cena oceli s antikoróznou ochranou

Z tohto prehľadu výhod a nevýhod je zrejmé, že výhody syntetických kotevných prvkov značne preyšujú ich nevýhody. V neposlednom rade hrá rolu aj ekonomická stránka veci. Aj keď je cena sklolaminátových tyčí o niečo vyššia, náklady na ich prepravu sú nižšie. Rovnako je veľmi jednoduchá ich manipulácia. Ich použitie je možné odporučiť tam, kde sa výhody najviac uplatnia vzhľadom na použité technológie a účel i životnosť stavby.

### 3.5 AKO SVORNÍKY FUNGUJÚ

Svorníky v zeminách a horninách pôsobia tak, že ich svojou prítomnosťou spevňujú. Zvyšujú stabilitu horninového prostredia. Horninový materiál sa takmer vždy poruší šmykom. Môže to byť pozdĺž puklín a plôch diskontinuit alebo cez samotný materiál horniny. Tieto poruchy spôsobuje pole napätia, ktoré obklopuje podzemné dielo. Příklad tohto poľa

obklopujúceho obdĺžnikové a kruhové dielo je na obrázku 16. Ak dosiahne zaťaženie pevnosti horninového materiálu, nastane porušenie šmykom so šmykovým posunutím. Existuje však široká škála rôznych porušení. Tieto závisia od stupňa porušenia horniny, stupne veľkosti napätia a podobne. Pôsobí tu mnoho ďalších faktorov, ktoré môžu priamo alebo nepriamo ovplyvniť porušenie prostredia, ktorého chovanie upravujú práve svorníky. Po inštalácii môžu zabrániť alebo obmedziť porušenie horniny. Zaťaženie sa prenáša z nestabilných častí do častí stabilných cez samotnú svorníkovú tyč. Práve pevnosť väzby svorník - hornina je určujúcou mierou účinnosti prenosu zaťaženia.



Obr. 16: Pole napätia okolo podzemného diela[08]

Prenos zaťaženia môže prebiehať nasledujúco:

- Zavesením
- Priamym obmedzením šmykového napätia
- Obmedzením osového zaťaženia

#### Prenos zaťaženia zavesením alebo zakotvením blokov

Tento pôvodný koncept vývinu mechanických svorníkov je dnes už neobvyklý. Slabšie vrstvy sú pomocou kotviacich prvkov zavesené k pevnejšej vrstve. Záťaž je koncentrovaná na podložku, prenášaná cez svorník až ku koreňu v stabilných vrstvách. Používa sa u blokov alebo klinov v silne porušenom pásme hornín

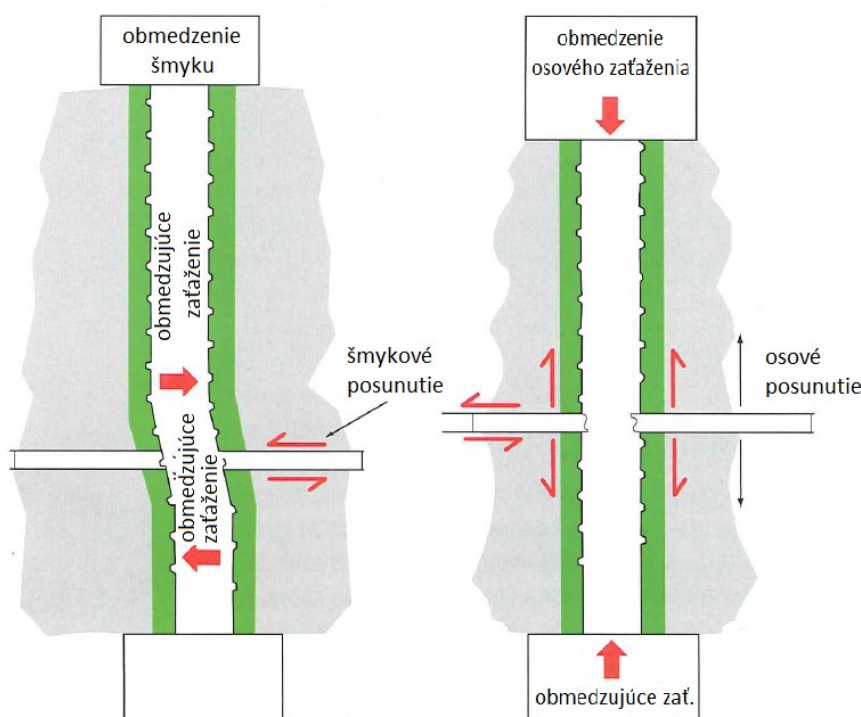
#### Priame obmedzenie šmykového napätia

Ak svorník prebieha priamo cez potenciálne šmykové plochy, tak priamo obmedzuje deformácie šmykom. Ak sa jedná o svorník tmelený len po časti vývrtu, umožňuje menšie

posunutie ešte pred nárastom šmykového odporu. Úplne tmelené svorníky sú v tomto smere najefektívnejšie, pretože poskytujú okamžitý odpor. V dôsledku lokalizovaného napätia nastáva drvenie horniny a lepidla a prenos zaťaženia prebieha ohnutím svorníku, ktoré taktiež vytvára osové zaťaženie. Čím je spojenie väčšie a tuhšie, tým väčší odpor proti šmyku systém poskytuje. Obmedzenie šmykového napätia je veľmi účinné pri zabráňovaní posuvného pohybu na plochách porušenia. Svorník pôsobí však len na svoje bezprostredné okolie v prípade, že sa materiál porušuje šmykom.

### Obmedzenie osového zaťaženia

Tento systém bráni priečnemu rozpínaniu spojenému so šmykovým pohybom na plochách nespojitostí. Aj v tomto prípade sú najefektívnejšie tmelené svorníkové systémy. Prenos zaťaženia prebieha osovým ťahovým napätím, sústredeným v mieste šmykovej plochy. Sila v kotviacej tyči taktiež slúži na prítlak plochy zvýšenou normálovou silou a taktiež obmedzuje porušenie šmykom. U bodovo kotvených prvkov sa na prenose zaťaženia podieľa celá dĺžka, čo má za následok väčšie pomerné predĺženie a nižší účinok zovretia. Avšak zostáva pravdou, že do bodovo kotvených prvkov sa dá technologicky oveľa ľahšie preniesť napätie. Schéma pôsobenia svorníku na obmedzenie osového zaťaženia aj priame obmedzenie šmykového napätia je na obrázku 17.

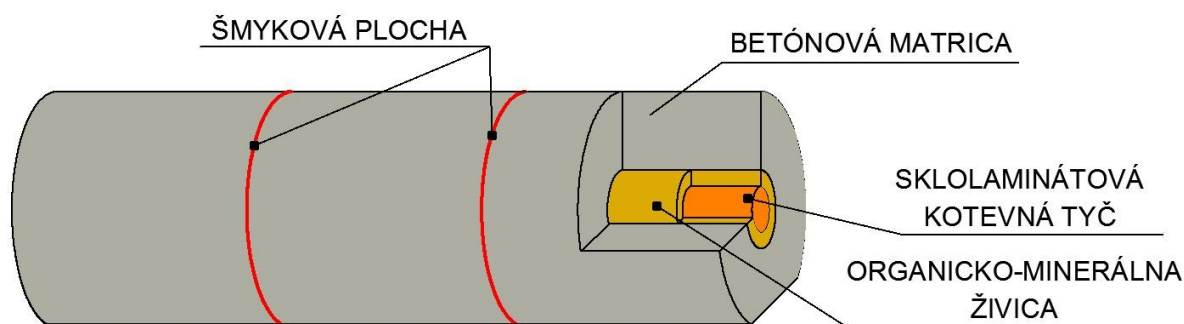


Obr. 17: Pôsobenie kotvy v horninovom prostredí[08]

#### 4 NÁVRH SKÚŠKY PRE STANOVENIE ŠMYKOVEJ ÚNOSNOSTI KOTEVNÝCH PRVKOV

Návrh skúšky pre experimentálne stanovenie strihovej únosnosti sklolaminátových kotevných tyčí vychádza z textu v predošlej kapitole. Hlavne z podkapitoly o priamom obmedzení šmykového napätia. Tá je založená na šmykových vlastnostiach systému svorník - lepidlo. Ako náhrada za horninového prostredie bude využité betónové valcové teleso s rôzne volenými šmykovými plochami. Teleso sa volí čo možno najtuhšie, aby sa eliminoval vplyv pretvorenia samotného telesa. Valce budú pevne uchytené pri lise, zo spodnej strany budú mať hladkú plochu pre lepšiu stabilizáciu a manipuláciu počas samotnej skúšky.

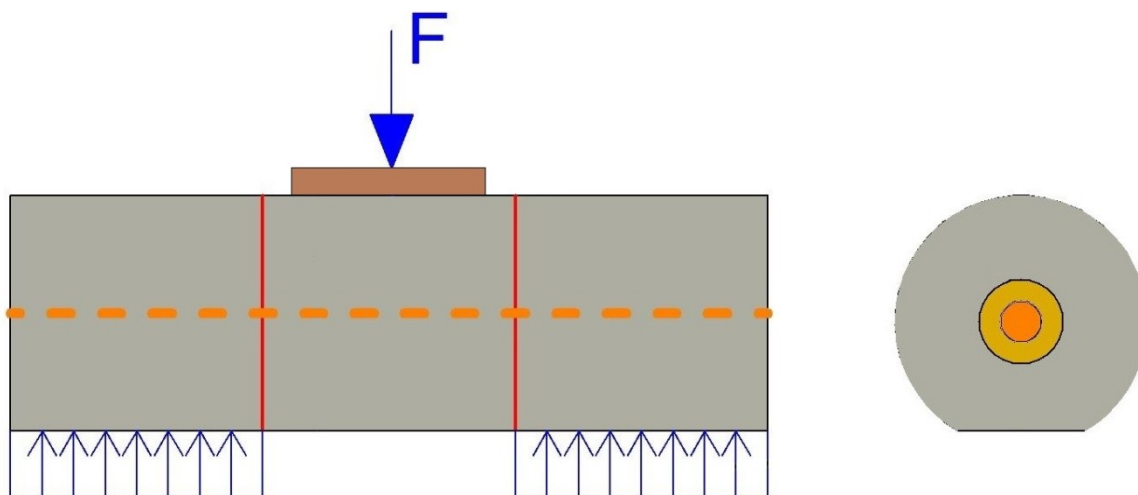
Po vytvorení budú telesá prevŕtané skrz pozdĺž dlhšej osi telesa. Použije sa vhodný priemer, aby sa čo najvernejšie napodobnili podmienky geotechnickej praxe. Na tvorbu otvoru bude použitá stojanová vŕtačka s jadrovým vrtákom. Diamantová korunka bude chladená počas vŕtania vodou. Z dôvodu zvýšenej presnosti a pre zníženie rizika poškodenia vzorku nebude použitý príklep. Po odvratní nasleduje proces rozdelenia vzorku na tri časti, ktoré budú oddelené jednotlivo šmykovými plochami. Na ich vytvorenie sa použije elektrická píla s diamantovým kotúčom. Proces rezania bude, rovnako ako proces vŕtania, chladený vodou. Šmykové plochy sú navrhnuté tak, aby sa správanie počas skúšky čo najviac priblížilo možnému správaniu vnútri horninového masívu. Na plochy, ktoré sú navzájom v kontakte sa naniesie vhodný prostriedok znižujúci účinok trenia. Po spojení je teleso pripravené na osadenie vhodného typu sklolaminátovej tyče a následné zatmelenie vhodným prostriedkom. Schéma navrhnutého vzorku je na obrázku 18.



Obr. 18: Schéma vzorky

Sila z lisu, ktorá bude pôsobiť na vzorku, je vyvodzovaná vždy na stredný diel pripraveného telesa. Bude pôsobiť cez oceľovú doštičku, ktorá roznesie napätie a viac priblíži

čisté strihové namáhanie. Reakcia tejto sily sa pravdepodobne prejaví na ploche styku častí, kde sa aj predpokladá porušenie tyče a lepiaceho prostriedku. Samotný lis obsahuje snímač deformácie, vďaka ktorému sa následne skúška vyhodnotí. Hlavným vzťahným bodom celej skúšky je horná hrana vzorky. Schéma pôsobenia zaťaženia je zobrazená na obrázku 19.









Obr. 19: Schéma nastavenia skúšky

Je predpokladané, že nie všetko zaťaženie sa preniesie kotevnou tyčou. Časť zaťaženia preniesie aj samotné lepidlo, podobne ako je tomu u kotiev tmelených po celej dĺžke. Podiely prenosu zaťaženia je komplikované z takejto skúšky určiť. Pre bližšiu predstavu však je možné otestovať aj samotné kotevné tyče.

Podľa možností sa bude skúška realizovať na rôznych variantoch šmykových plôch. Vyhodnotenie skúšok bude prebiehať sledovaním medznej sily porušenia, spôsobu porušenia vzorky ale aj priebehu pracovne - deformačného diagramu, ktorý bude hlavným výstupom skúšky. Voľba skúšky aj použité materiály, ako sklolaminátová tyč alebo lepiaca zmes, sú volené na základe najčastejších použití v praxi.

Únosnosť sa bude zisťovať na sklolaminátovej kotevnej tyči ROCKBOLT priemeru 25 mm. Dĺžka tyče bude prispôbena skúšanému telesu, nebude však kratšia, aby zbytočne krátka tyč nespôsobovala výkyvy v nameraných hodnotách. Ako tmel sa použije dvojzložková, rýchlo reagujúca, nepeniaca živica postavená na organicko – minerálnej báze. Smery šmykových plôch sú volené tak, aby pokryli dosť široké spektrum smerov plôch, ktorým sú tyče vystavované v reálnom prostredí ich pôsobenia. Bude sledovaná závislosť uhlov šmykových plôch na nameraných hodnotách a analyzovaný vplyv veľkosti odklonu plochy na jej správanie. V tabuľke 4 sú zobrazené varianty skúšobných telies.

Názov	Zvieraný uhol	Náčrt	Pohľad zhora	Počet
Typ A	90°			3
Typ B	60°			3
Typ C	30°			3

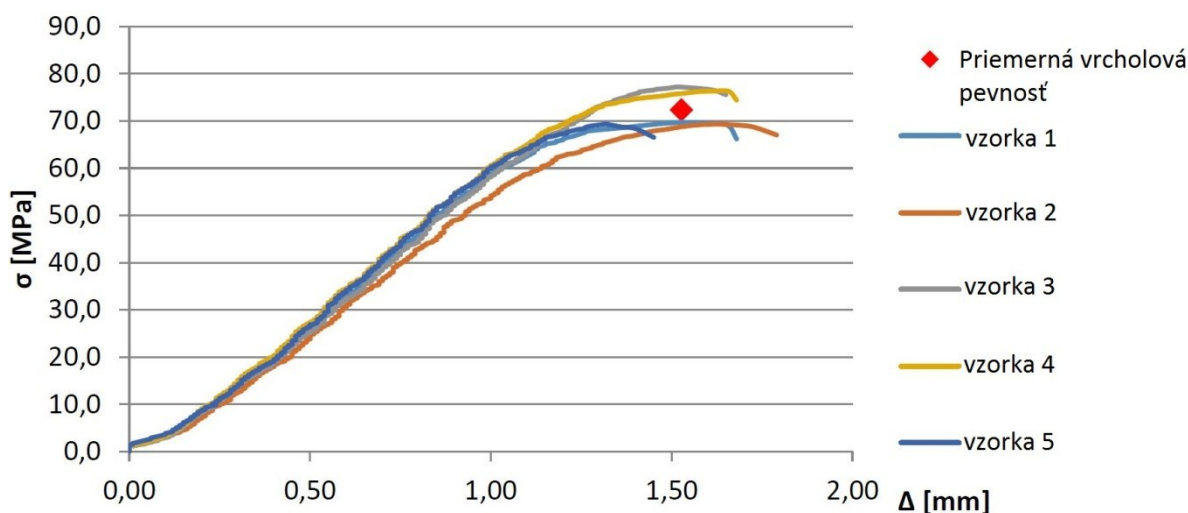
Tab. 4: Varianty skúšobných telies

Pre každý variant z tabuľky 4 budú k dispozícii tri identické vzorky. Budú charakterizované identickými rozmermi, typom a priemerom tyče, lepidlom aj smerom šmykových plôch. Za identických podmienok sa každá skúška bude opakovať tri krát. Pri skúške sa bude vypisovať protokol, do ktorého sa zaznamenajú všetky dôležité aj menej dôležité údaje a poznámky. Celkovo sa tak realizuje deväť skúšok tyčí v betónovej matrici s lepidlom a tri skúšky samotnej sklolaminátovej tyče.

## 5 REALIZÁCIA EXPERIMENTÁLNYCH SKÚŠOK

### 5.1 PRÍPRAVA SKÚŠOBNÝCH TELIES

Receptúra pre prípravu betónových telies je riešená už v diplomovej práci *Experimentální stanovení únosnosti tmelených svorníků* od Ing. Jaroslava Holíša, ktorý volil vyššiu triedu pevnosti za účelom zníženia vplyvu pomerných pretvorení betónovej matrice. Vzorky vytvorené pred približne rokom sa ukázali byť ako vhodné aj pre účel tejto diplomovej práce. Receptúra s vyššou pevnosťou viac reprezentuje skutočné prostredie pôsobenia svorníkovej výstuže. Pevnosť sa zisťovala po 28 dňoch na kockových vzorkách. Pre účely zistenia pevnosti betónu bolo vytvorených päť vzoriek. Skúška prebiehala podľa normy ČSN EN 12390-3: Skúšanie stvrdnutého betónu – časť 3. Výsledky týchto skúšok sú zobrazené v grafe 1. Prevzaté z [06].



Graf 1: Deformačná charakteristika betónu[06]

Valcový tvar je vhodný na použitie ako vzorka. Sú však potrebné ďalšie úpravy. Rozmery prvku sú nasledovné. Priemer je 150 mm a výška vzorky 450 mm. Veľkosť vzoriek je daná veľkosťou foriem, ktoré sa nachádzali v priestoroch laboratória. Pre výšku 450 mm bolo volené nastavenie existujúcej formy. Tá má výšku 300 mm. Nastavenie sa volilo pomocou plastovej rúrky o identickom priemere.

Veľkosť otvoru sa zvolila ako vývrt o priemere 35 mm. Priemer je volený ako adekvátny k priemeru tyče 25 mm. Na základe internej príručky pre doly *Svorníková výstuž – príručka*[11] v rámci ostravsko-karvinského revíru. Pre svorníky lepené živicom má byť, podľa technológie vŕtania, otvor min o 3-8 mm väčší. Zvolený priemer teda vyhovuje predpokladom a bude sa jeho zvolenie považovať za správne. Taktiež napodobní spôsob



zabudovania, aký je volený aj v geotechnickej praxi. Na vývrt bola použitá stojanová vŕtačka s ručnou reguláciou prítlačnej sily a kontinuálneho chladenia diamantovej korunky. U takého typu vŕtačky nie je zaručené kolmé dovŕtanie, avšak mierne odklonenie pravdepodobne nebude spôsobovať chyby alebo výkyvy v nameraných hodnotách. Zostava, použitá na vŕtanie a vzorka je na obrázku 20.

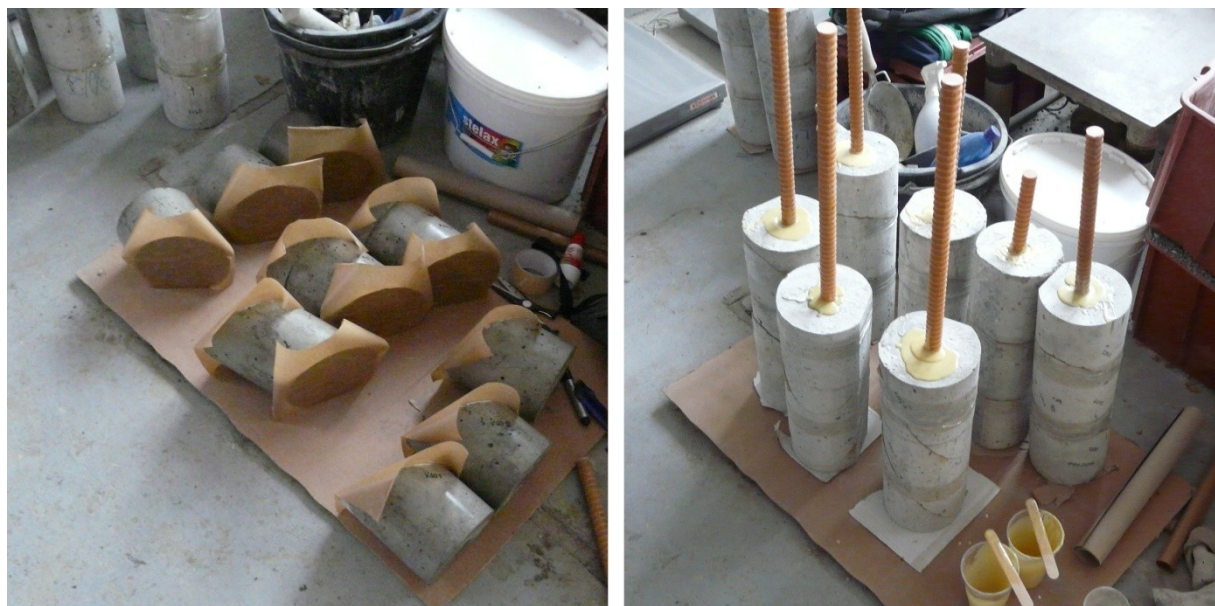


*Obr. 20: Vŕtacia technika a skúšobné betónové teleso[06]*

Šmykové plochy, na ktorých pravdepodobne prebehne najväčšia časť deformácií sú volené tak, aby preukázali vplyv šikmosti plochy na celkovú šmykovú únosnosť systému lepidlo – svorník. Pre skúšky sa volil odklon  $90^\circ$  od pozdĺžnej osi svorníku, ďalej uhly  $60^\circ$  a  $30^\circ$ . Pre rozdelenie telesa na jednotlivé diely sa použila kotúčová píla s diamantovým kotúčom a kontinuálnym chladením rezu vodou.

Vzorky, ktoré už obsahovali vývrt pre tyč, a boli rozdelené šmykovými plochami, sa mohli opatriť vrstvou regulujúcou trenie medzi plochami betónu. Pre túto skúšku bola zvolená teflónová vrstva, ktorou sa pokryli všetky stýkajúce sa časti. Táto vrstva bola aplikovaná vo forme teflónového papiera, bežne používaného v domácnosti. Vrstva bola prichytená bežným lepidlom len z manipulačných dôvodov. Existuje predpoklad, že počas skúšky bude teflónová vrstva zničená. Jej hlavnou úlohou je odstránenie vplyvu trenia medzi betónovými lícami šmykovej plochy, ktoré by mohlo skresľovať namerané hodnoty sily a deformácie. Aplikáciu teflónovej vrstvy a hotové telesá sú na obrázku 21.





*Obr. 21: Fáza prípravy skúšobného telesa*

Vzorky sa po rezaní a nalepení teflónovej vrstvy opäť príslušne spoja. Ich spojenie dočasne zaistí lepiaca páska, ktorá bude po vytvrdnutí lepidla odstránená. Slúži na zachovanie tvaru telesa počas aplikácie sklolaminátovej tyče s lepiacou zmesou.

Tyče boli k dispozícii v skladiisku. Sú to sklolaminátové tyče typu ROCKBOLT priemeru 25 mm. Sú v rôznych dĺžkach avšak vždy viac ako potrebných 450 mm, čo je výška vzorky. Použitie týchto tyčí je popísané v kapitole 3.4. Vlastnosti týchto tyčí sú k dispozícii v technických listoch a v tabuľke 5 sú uvedené niektoré z nich.

Parameter	MJ	Tyč K60-25
Vonkajší priemer	mm	25
Celková plocha	mm <sup>2</sup>	430
Plocha namáhaná napätím	mm <sup>2</sup>	346
Únosnosť v ťahu na medzi pevnosti	kN	350
Napätie v ťahu	MPa	1000
Strihová únosnosť (strih 90°)	kN	160
Strihové napätie	MPa	460
E – modul (ťah)	MPa	50 000
Hmotnosť	kg.m <sup>-1</sup>	0,9

*Tab. 5: Vybrané vlastnosti sklolaminátovej tyče[13]*

Poslednou etapou prípravy vzorku je zalepenie svorníkov do pripravených matric. Ako tmel sa využila organicko - minerálna živica GEOFLEX. Používa sa na lepenie tyčí aj kotiev.

Jej ďalšie aplikácie sú napríklad sanácie, spevňovanie, utesnenie a pod. Dôležitou vlastnosťou pri príprave a lepení touto živicom je, že dosahuje pevnosti už po 15tich minútach a nepení ani pri kontakte s vodou. Je klasifikovaná ako okamžite únosná a je použiteľná pri teplote prostredia od 5 do 40 °C. Niektoré vlastnosti uvádza tabuľka 6.

Parameter	MJ	Hodnota
Prilnavosť k betónu	MPa	4,0
Pevnosť v tlaku po 24 hodinách	MPa	39
Modul pružnosti v tlaku po 24 hodinách	MPa	450
Pevnosť v ťahu po 24 hodinách	MPa	62
Pomerné predĺženie pri pretrhnutí po 24 hodinách	%	6,0
Pevnosť v ohybe po 24 hodinách	MPa	12,1
Modul pružnosti v ohybe po 24 hodinách	MPa	370

Tab. 6: Vybrané mechanické vlastnosti živice GEOFLEX[13]

Vybrané dáta sú laboratórne hodnoty a nemusia byť presné v každých podmienkach. Spracovanie živice prebiehalo pomocou ručného intenzívneho miešania po dobu asi jednej minúty. Živica má schopnosť tiecť asi dve minúty, preto bolo zvolené miešané množstvo, ktoré vystačilo na zaliatie jedného vývrtu so svorníkovou tyčou. Jednotlivé zložky sa zmiešavajú objemovo v pomere 1:1. Zložky boli miešané pri teplote 24,5 °C a vlhkosti 55%, takže splňujú podmienky technických listov pre spracovanie.

Vzorky sú po zalepení a odrezaní pripravené na samotné testovanie v podmienkach laboratória.

## 5.2 REALIZÁCIA EXPERIMENTÁLNYCH SKÚŠOK

Skúšky sa realizovali v laboratóriu stavebných hmôt na VŠB – Technickej univerzite Ostrava, stavebná fakulta. Skúšobne telesá sa vyrobili špeciálne pre tento účel. Popis a výrobný postup týchto telies je uvedený v predchádzajúcej kapitole. Pre deštrukčné skúšky sa použil lis s nastaviteľnou rýchlosťou deformácie alebo nastaviteľným prírastkom zaťažovacej sily. Pre potreby tejto série testov bola navrhnutá rýchlosť deformácie 1 mm/s, pričom najnižšia možná rýchlosť je 0,5 mm/s. Rýchlosť bola volená s ohľadom na presnosť výsledku, kvantitu zaznamenaných dát ale i na celkovú časovú náročnosť laboratórnej skúšky. Doba trvania od usadenia vzorku do prístroja až po jeho deštrukciu je rovná približne 15 minút.

Princíp skúšky, ktorej schéma je zobrazená v predchádzajúcej kapitole: *Návrh skúšok pre experimentálne stanovenie strihovej únosnosti sklolaminátových kotevných prvkov*, je volený tak, aby simuloval pravdepodobné správanie sklolaminátovej tyči v horninovom masíve. Tyč aj tmel, ktorým je vo väčšine prípadov v praxi obalená po celej dĺžke, nie sú namáhané čistým strihom, ale aj inými druhmi vnútorných síl. Ide hlavne o osovú silu, špeciálne ťah, alebo o ohybové sily. Je nutné dodať, že sa upustilo od experimentálneho skúšania samotných sklolaminátových tyčí. Dôvodom je, že laboratórium nie je pre tento druh skúšky patrične vybavené. Vo vybavení nie sú jedno-strižné alebo dvoj-strižné šmykové čeľuste. Príklad takýchto čeľustí je zobrazený na obrázku 22. Reálne nastavenie skúšky spolu s lisom je zobrazený na obrázku 23.



Obr. 22: Jedno strižné a dvoj strižné čeľuste[07]



Obr. 23: Reálne nastavenie skúšky



Ako je vidieť na obrázku 23, vzorka je položená oceľových štvorcových doštičkách. Dĺžka strany jednej doštičky je 150 mm, jej výška je 20 mm. Tieto doštičky slúžia ako podpora. Ich deformácia je voči deformácií vzorku zanedbateľná. Cez podobnú doštičku sa prenáša aj zaťaženie od lisu. Podoprenie krajných dielov a zaťaženie prostredného dielu je realizované tak, aby sa napätie vo vzorke čo najviac blížilo čistému šmyku. Taký druh namáhania však nie je možné dosiahnuť. Avšak je dosiahnuteľné, aby šmyk bol prevládajúcim napätím v sústavy. Detail uloženia vzorky na oceľových doštičkách je zobrazený na obrázku 24.



*Obr. 24: Detail uloženia vzorky pre skúšku strihom*

Najvyššie možné zaťaženie, ktorý skúšaný systém unesie, závisí vždy na najslabšom článku systému. V prípade strihovej skúšky systému betón – tmel – svorník je najslabším článkom práve betónová matrica, ktorá sa poruší ešte pred porušením sklolaminátovej kotevnej tyče. Poškodenie betónovej matrice môže mať rôzne príčiny. Najpravdepodobnejšie sa javí ťahové napätie, ktoré betón prenáša veľmi obmedzene a rýchlo stráca súdržnosť. Porušenie dielu je zobrazené na obrázku 25. Betónová matrica sa porušila na kontakte pôsobeného zaťaženia a na spodnej strane prostredného dielu. Po porušení a rozpraskaní betónu už systém nie je schopný prenášať zvýšené zaťaženie, avšak sklolaminátová tyč ďalej pôsobí ako výstužný prvok brániaci rozpadu systému. Podobný scenár, teda porušenie betónu, sa opakoval pri všetkých typoch strihových skúšok, ktorým sa táto diplomová práca venuje. K dispozícii sú posuny a k nim pripadajúce zaťaženie. Skúška sa ukončila, keď deformácie presiahli hodnoty 10 mm. Všetky namerané hodnoty, protokoly a fotodokumentácia sa nachádza ako príloha k tejto práci.



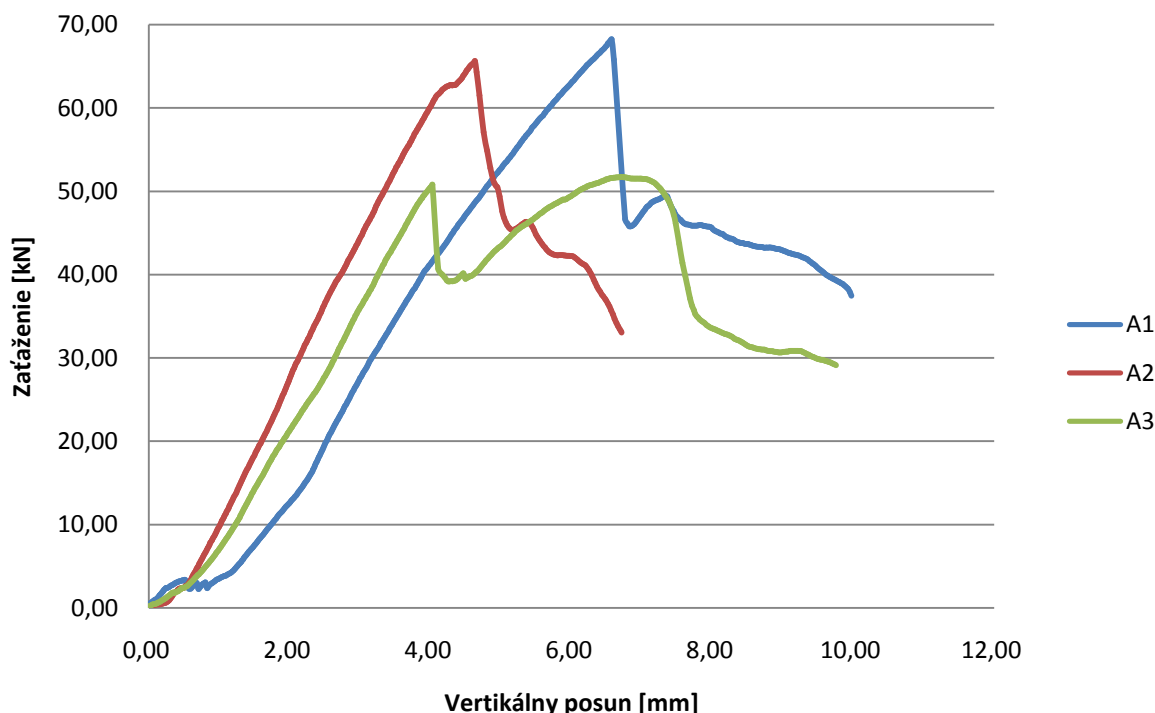
*Obr. 25: Poškodený prostredný diel vzorky*

## 6 VYHODNOTENIE EXPERIMENTÁLNYCH SKÚŠOK

Ako už poukázala predchádzajúca kapitola, experimentálne meranie sa neuskutočnilo podľa očakávaní. Betónové teleso stratilo súdržnosť a následne sa porušilo ešte predtým, ako sa dosiahla medzná strihová pevnosť sklolaminátového prvku. Tabuľková strihová únosnosť kotevnej tyče ROCKBOLT priemeru 25 mm je 160 kN. V realizovaných testoch sa však najviac dosiahlo len zlomku tejto hodnoty a to približne 60 kN, ktorá je rozdelená na dve šmykové plochy. Avšak aj tieto výsledky umožňujú skonštruovať analýzy pôsobenia svorníku v systéme svorník – lepidlo - hornina, a to hlavne so zameraním na bezprostredné okolie svorníkovej tyče.

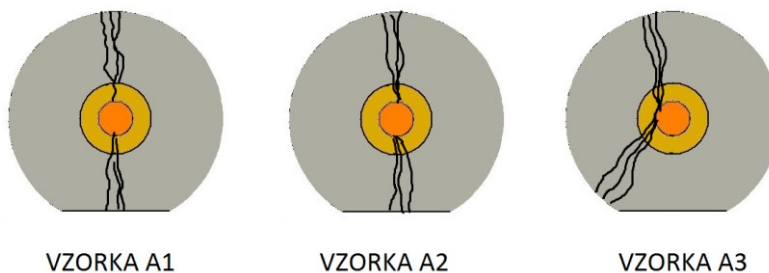
### 6.1 POROVNANIE SKÚŠOK JEDNOTNÉHO TYPU

Prvým krokom je vyhodnotenie reprodukovateľnosti priebehov testov, ktoré boli vykonané na identickej vzorke. Graf 2 zobrazuje priebehy troch skúšok na vzorke typu A, ktorej šmyková plocha je odklonená od pozdĺžnej osy vzorky o  $90^\circ$ . Prierezová tyč s lepidlom má pozdĺž tejto plochy tvar kruhu.

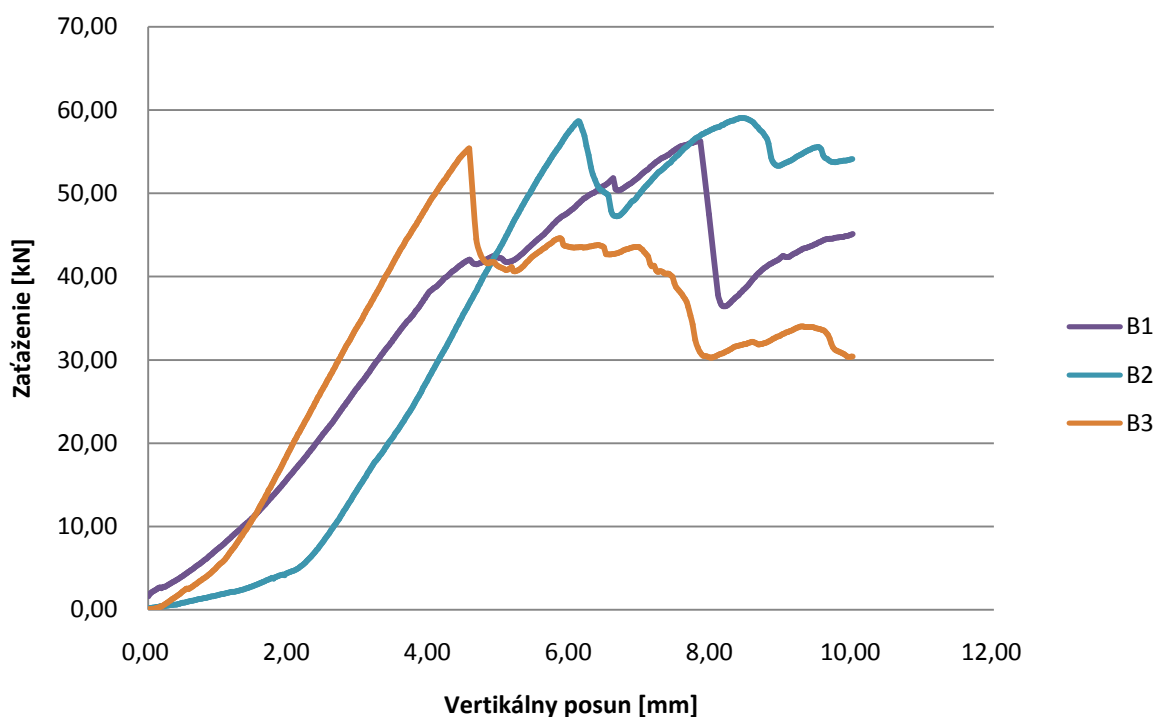


Graf 2: Pracovne - deformačný diagram pre vzorky typu A

Priebehy pracovno-deformačných diagramov pre vzorky typu A sú zobrazené v grafe. Ako je možné si všimnúť, každá z kriviek má zo začiatku oveľa menšie stúpanie ako zvyšok krivky. Predpokladá sa, že tvar krivky v tomto mieste je spôsobený oveľa nižším modulom pružnosti lepidla, ktoré sa v dôsledku zaťaženia začalo deformovať ako prvé. Modul pružnosti lepiacej zmesi je niekoľko krát nižší ako modul pružnosti betónu alebo sklolaminátovej tyče. Každá z kriviek sa vyznačuje výrazným prepacom pri dosiahnutí medze pevnosti betónového materiálu. Po dosiahnutí vrcholového bodu už systém nie je schopný prenášať vyššie hodnoty zaťaženia. Toto tvrdenie však neplatí pre vzorku označenú ako A3. Priebeh jej trhlín sa líši od priebehu trhlín u vzorky A1 a u vzorky A2. Trhliny u spomenutých vzoriek prechádzajú priamo cez výstužnú tyč a preto betón, ktorý sa v kolmom smere porušil už nie je schopný prenášať ďalšie zaťaženie. Pri vzorke A3, ktorá sa porušila pri najmenších hodnotách zaťaženia, sa trhliny šíria mimo zvislú osu vzorku a neprechádzajú stredom tyče, preto tento systém počas skúšky preniesol vysoké zvyškové zaťaženie a tyč aj po porušení betónu plnila výstužnú úlohu v systéme. Predpokladaný priebeh trhlín je schematicky zobrazený na obrázku 26. Tento priebeh je vysledovaný na základe fotodokumentácie z priebehu testov a osobnej prítomnosti na mieste sledovania.



Obr. 26: Priebeh trhlín u vzoriek typu A



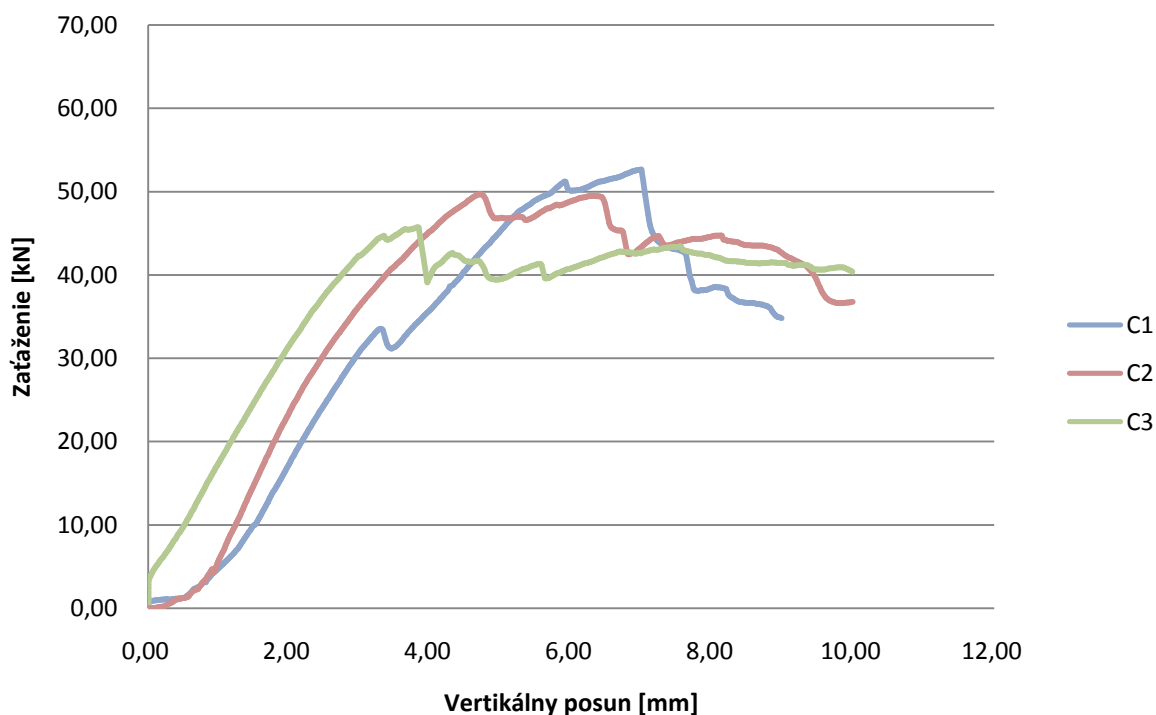
Graf 3: Pracovne - deformačný diagram pre vzorky typu B

Na grafe 3 sú zobrazené priebehy testov realizovaných na vzorkách typu B. Tento typ vzoriek vykazuje najviac podobné hodnoty vrcholového porušenia systému. Nábeh je podobný a pravdepodobne opäť spôsobený nižším modulom pružnosti lepidla. Oproti vzorkám typu A sa trhliny šíria každou z troch častí skladby vzorky. Taktiež je z priebehu kriviek viditeľné, že systém prenáša viac zaťaženia aj po porušení betónovej matrice. Môže to byť spôsobené zväčšenou prítomnosťou ohybového namáhania a tým zvýšením trením medzi jednotlivými dielmi v ich horných častiach. Vplyv ohybu si je možné všimnúť na obrázku 27. Pri vzorke označenej ako B3 boli pozorované podobné porušenia ako pri vzorkách typu A. To znamená, že najviac porušený je stredný diel. Odpovedá tomu aj priebeh deformačnej krivky telesa B3.



*Obr. 27: Viditeľný ohyb na vzorke B1*

Priebehy kriviek zobrazujúcich závislosť napätí a pretvorení, ktoré vznikli na základe údajov zo skúšok na vzorkách typu C, sú zobrazené na grafe 4. Porušenie všetkých vzoriek typu C sa uskutočnilo na najnižších hodnotách tlačenej sily lisu v porovnaní ďalšími dvoma typmi. Trhliny sa opäť šíria celým telesom vzorky. Betón sa rozpukal na všetkých troch dieloch. Po porušení betónu systém stále odoláva vcelku značnému namáhaniu a tyč plní úlohu výstužného prvku. Podobne ako pri vzorkách typu B to môže spôsobovať zvýšená prítomnosť ohybového namáhania pripravenej vzorky. Je to viditeľné hlavne na zdvíhajúcich sa okrajoch skúšaného telesa.



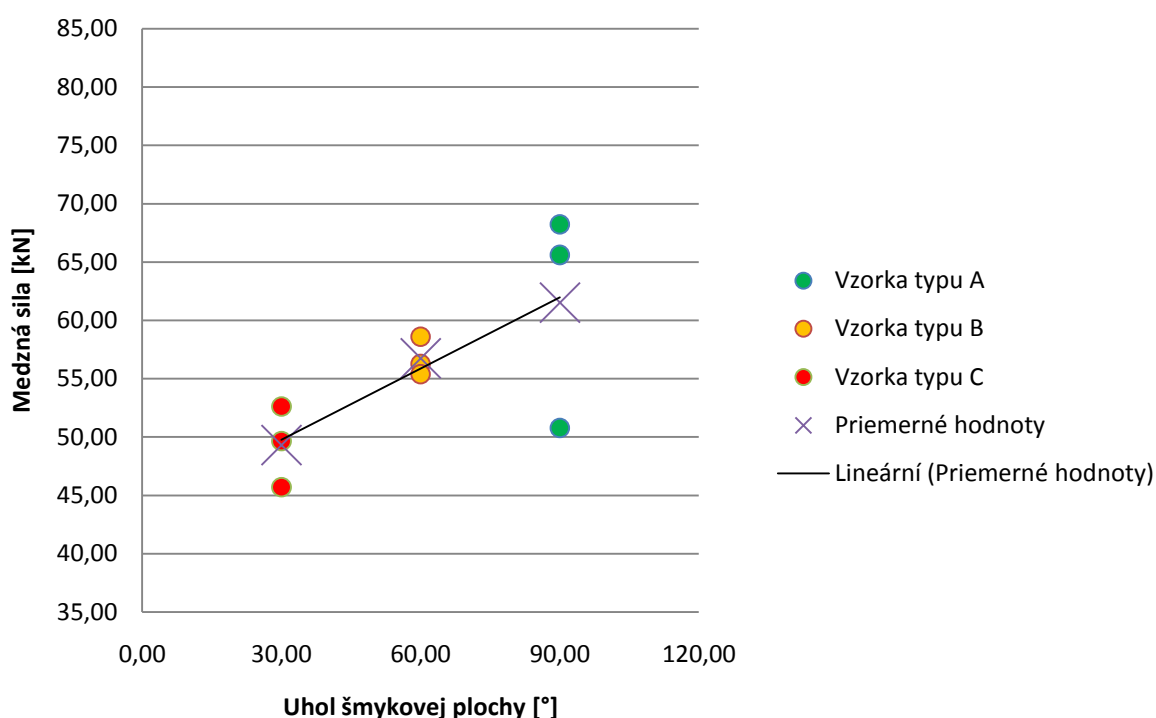
*Graf 4: Pracovne - deformačný diagram pre vzorky typu C*



Celkovo sa môže konštatovať, že vykonané skúšky prejavujú určitý typ závislosti. Môžu dopomáhať predstave pôsobenia sklolaminátovej výstuže v systéme hornina – lepidlo – svorník. Skúšky sú reprodukovateľné a v budúcnosti je možné vykonať podobný typ skúšok a výsledky porovnať s výsledkami dosiahnutými v tejto práci.

## 6.2 VPLYV UHLU ŠMYKOVEJ PLOCHY NA ÚNOSNOSŤ SYSTÉMU

V diplomovej práci sa taktiež analyzuje vplyv smeru šmykovej plochy na únosnosť systému vystuženého svorníkovou tyčou. Sériu skúšok vykonaných na vopred pripravených telesách odhalila závislosť medzi smerom šmykovej plochy a medznou silou, pri ktorej došlo k porušeniu súdržnosti betónovej matrice. Grafické vyhodnotenie tohto priebehu je zobrazené v grafe 5. Údaje z ktorých graf čerpá sú uvedené v tabuľke 7.



Graf 5: Medzné sily pri porušení

Označenie Vzorky	Uhol šmykovej Plochy [°]	Medzná Sila [kN]	Medzný Posun [mm]	Priemerná medzná Sila [kN]	Priemerný medzný Posun [mm]
A1	90,00	68,22	6,57	66,92	5,08
A2		65,61	4,63		
A3		50,78	4,03		
B1	60,00	56,26	7,81	56,74	6,16
B2		58,59	6,12		
B3		55,38	4,55		
C1	30,00	52,61	7,00	49,32	5,17
C2		49,66	4,70		
C3		45,70	3,82		

Tab. 7: Medzné hodnoty porušení

Je možné si všimnúť, že medzná hodnota pri vzorke A3 je mimo predpokladaný interval. Je to zreteľne vidieť hlavne v grafickom prevedení nameraných hodnôt. Preto sa volí štatistické vyhodnotenie nameraných hodnôt, za účelom možného vyradenia zo štatistického súboru.

### 6.2.1 Štatistické vyhodnotenie nameraných hodnôt

Na sústave testov a výsledkov sa vykonalo štatistické vyhodnotenie v regulačnej podobe. Meraným parametrom v procese je vrcholová tlaková sila lisu pri porušení betónovej matrice. Pri vyhodnotení sa záujem orientuje na aritmetický priemer a smerodajnú odchýlku. Aritmetický priemer sa vypočíta podľa vzťahu 1.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Kde je:

$\bar{x}$	...aritmetický priemer
$n$	...počet vzoriek
$x_i$	...nameraná hodnota pre vzorku

Vypočítaný priemer bude pre každý set deštrukčných skúšok iný, podľa toho z akých hodnôt bude získaný. Smerodajná odchýlka je definovaná ako kladná druhá odmocnina z rozptylu. Hovorí o tom, ako široko sú rozložené hodnoty v množine. Smerodajnú odchýlku získame výpočtom podľa vzťahu 2.

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

Kde je:  $s_x$  ...smerodajná odchýlka  
 $\bar{x}$  ...aritmetický priemer  
 $n$  ...počet vzoriek  
 $x_i$  ...nameraná hodnota pre vzorku

Cieľom štatistického vyhodnotenia je určiť hranice intervalu, ktorý bude určovať významnú oblasť hodnôt testu. Získa sa tak predstava o kritickej oblasti, ktorá leží mimo tieto hodnoty. V prípade zistenia, že niektoré hodnoty sú mimo vymedzený interval, je ich možné vylúčiť zo štatistického súboru a vypracovať nové závery už bez týchto hodnôt. Dolný a horný interval oblasti sa určí ako zmena strednej hodnoty o trojnásobok smerodajnej odchýlky. Výpočet je možné realizovať podľa vzťahov 3 a 4.

$$DH = \bar{x} - 3 \cdot s_x \quad (3)$$

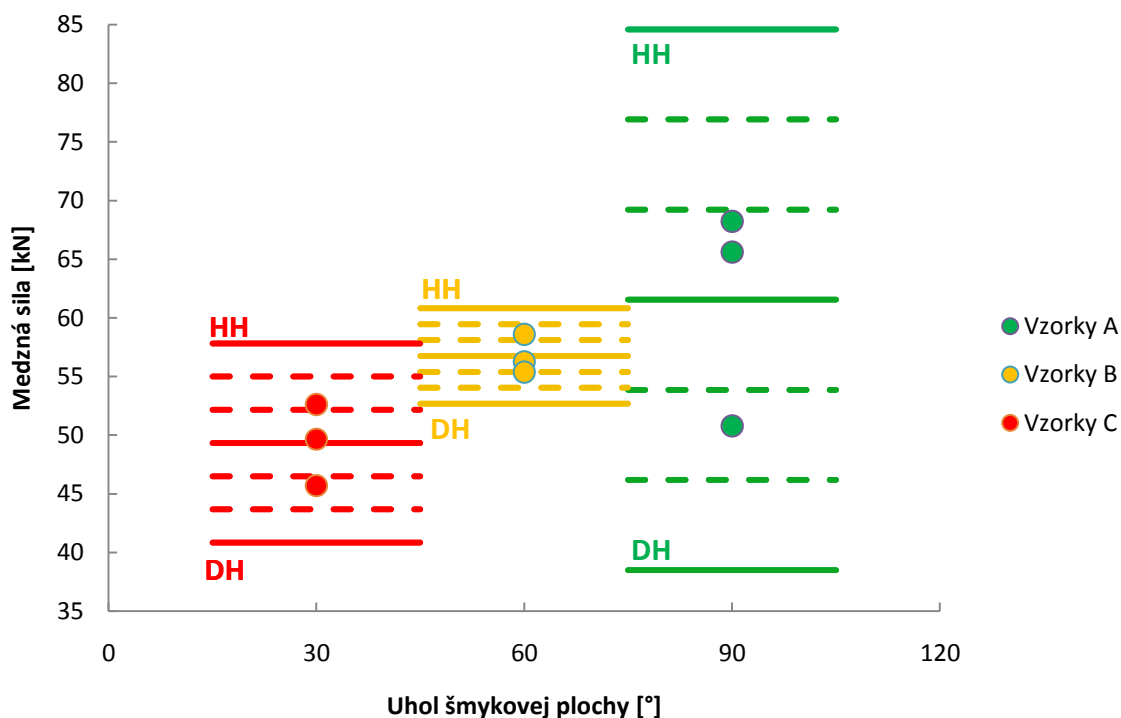
$$HH = \bar{x} + 3 \cdot s_x \quad (4)$$

Kde je:  $DH$  ...dolná hranica intervalu  
 $HH$  ...horná hranica intervalu  
 $s_x$  ...smerodajná odchýlka  
 $\bar{x}$  ...aritmetický priemer

Po aplikovaní vybraných vzťahov na konkrétne dáta, získané pri experimentálnych skúškach, získame intervaly významných oblastí. Získané dáta, zapísané v tabuľke 8 sú graficky spracované v grafe 6.

Označenie Vzorky	Uhol šmykovej Plochy [°]	Medzná Sila [kN]	Priemerná medzná Sila [kN]	Smerodajná Odchýlka [kN]	Dolná hranica intervalu [kN]	Horná hranica intervalu [kN]
A1	90,00	68,22	66,92	7,68	38,50	84,57
A2		65,61				
A3		50,78				
B1	60,00	56,26	56,74	1,35	52,68	60,80
B2		58,59				
B3		55,38				
C1	30,00	52,61	49,32	2,83	40,83	57,82
C2		49,66				
C3		45,70				

Tab. 8: Tabuľka štatistického vyhodnotenia

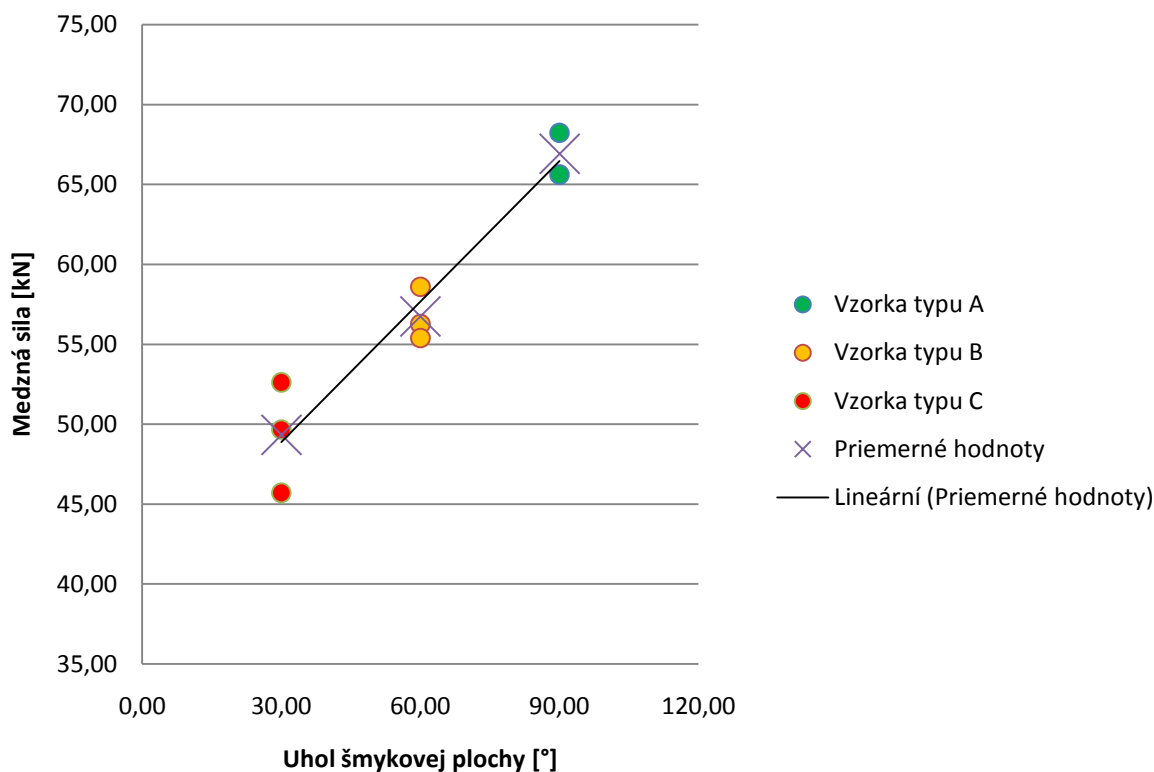


Graf 6: Štatistické vyhodnotenie v grafickej forme

Po štatistickom vyhodnotení je možné výsledky analyzovať. Z grafického vyjadrenia je jasne vidno, že všetky získané hodnoty ležia v pásme užitočných dát. Je to spôsobené hlavne nie veľkým počtom dát, ktoré vstupujú do štatistického súboru. Dôsledkom týchto vstupov je fakt, že aj hodnota vzorky A3, ktorá leží značne mimo ďalšie dve hodnoty, nie je štatisticky mimo intervalu. Je to spôsobené hlavne vysokou hodnotou smerodajnej odchýlky, ktorej vysoká hodnota je opäť spôsobená vyšším rozptylom nízkeho počtu hodnôt.

## 6.2.2 Analytické vyhodnotenie experimentálnych skúšok

Podľa predchádzajúcej kapitoly nie je možné vylúčiť žiadnu z nameraných hodnôt. Pri dôkladnej analýze systému porušenia jednotlivých vzoriek však bolo zistené, že porušenie vzorky A3, je tvarovo a smerovo odlišné od vzoriek A1 a A2. Tieto rozdiely sú popísané už v kapitole 6.1. Diferentný vývoj trhliny môže byť spôsobený rôznymi faktormi, ktorými môže byť trhlina v betóne, poloha tyče v otvore aj nepriliehajúce šmykových plôch. Z tejto analýzy je možné dáta vzorky A3 z vyhodnotenia vylúčiť a analyzovať výsledky zvyšných skúšok. Graficky je vyhodnotenie zobrazené na Grafe 7.



Graf 7: Upravené medzné sily pri porušení

Takto upravený graf znázorňuje očividnú závislosť medzi veľkosťou uhlu šmykovej plochy a medznou silou porušenia betónovej matrice. Z takto vyhodnotených dát sa dá konštatovať, že čím „šikmejšia“ je šmyková plocha, tým viac svorník poškodzuje okolité prostredie.

Túto teóriu podporuje aj korelačný koeficient. Koreláciou sa rozumie závislosť a je možné ju hľadať medzi znakmi prvkov štatistického súboru. V prípade diplomovej práce sa skúma závislosť medzi uhlom šmykovej plochy a veľkosťou sily pri porušení matrice. Hodnota korelačného koeficientu vyjadruje lineárnu mieru závislosti. Jeho hodnoty sa pohybujú od -1 do 1. Ak sú znaky nezávislé, korelačný koeficient je nulový. V prípade vyhodnotenia štatistického súboru bez vylúčenia hodnôt vzorky A3 je hodnota korelačného koeficientu rovná 0,72 bodu, čo predstavuje mierny stupeň závislosti. S vylúčením vzorky A3 nadobudne korelačný koeficient hodnotu 0,95 bodu, čo je silná závislosť medzi prvkami.

### 6.3 ZHRNUTIE VYHODNOTENIA EXPERIMENTÁLNYCH SKÚŠOK

Celkové zhodnotenie laboratórnych testov je teda kladné. V skúšobných podmienkach sa podarilo vytvoriť fyzický model pôsobenia svorníkovej výstuže. Séria testov vykonaných na skúšobných vzorkách preukázala závislosť smeru šmykovej plochy na medzných deformáciách. Predpoklad porušenia tyče nenastal pravdepodobne z dôvodu menšej robustnosti matrice, prípadne príliš vysokej strihovej únosnosti sklolaminátového kotevného prvku. Je možné, že sa matrica porušila vznikom ťahového namáhania, ktoré nevystužený betón prenáša len v minimálnej miere. Jednotlivé pracovne – deformačné diagramy znázorňujú chovanie systému vystuženého svorníkom. Pri šikmých strihovými plochách zasahuje do výsledkov vplyv ohybového namáhania, avšak preukazuje sa výstužný charakter tyče, ktorý stabilizuje systém aj po porušení súdržnosti okolitého prostredia.

Vplyv smeru šmykovej plochy na výsledky laboratórnych testov je preukázateľný hlavne v grafickom vyjadrení výsledkov. Čím je šmyková plocha odklonená od pozdĺžnej osi o menší uhol, tým je okolité prostredie náchylnejšie na porušenie. Kvôli inému systému porušenia sa vzorka A3 odstránila z vyhodnotenia a tým sa preukázala ešte väčšia závislosť medzi sledovanými prvkami. Dokazuje to aj hodnota štatistického koeficientu, ktorá však už pred odstránením spomínaných dát preukazovala miernu závislosť. Po úprave vstupných dát jeho hodnota stúpala o 0,23 a jedná sa o závislosť silnú. Sériou testov sa teda prejavil vplyv uhlu šmykovej plochy na správanie prostredia v bezprostrednom okolí.

V práci sú zámerne nevykonané výpočty napätí v prierezových plochách. Dôvodom je fakt, že nedošlo k porušeniu sklolaminátovej tyče. Je však možné predpokladať, že ak by nedošlo k porušeniu matrice, najvyššie hodnoty únosnosti by pravdepodobne boli namerané na vzorkách typu C. Tvrdenie je založené na fakte, že pri vyššej šikmosti narastá prierezová plocha kladúca odpor zaťaženiu. Pri uhle  $90^\circ$  má plocha tvar kruhu a najnižšie hodnoty prierezovej plochy.

## 7 ZÁVER

Diplomová práca stručne zhodnotila prínos kompozitných materiálov pre spoločenské užitie. Synergický účinok zložiek dáva kompozitom nadpriemerné vlastnosti a v spoločnosti si nachádzajú stále väčšie uplatnenie. Spojenie odolnej matrice a vysokopevnostných sklenených vlákien umožňuje vytvoriť materiál, ktorý svojimi vlastnosťami predstihuje tradičné materiály. Uplatnenie si našli v mnohých technických odboroch a sú používané aj pri výrobe širokého spektra kotviacich prostriedkov.

Cieľom tejto práce bolo predstaviť kompozitné sklolaminátové kotevné tyče a realizovať na nich sériu testov za účelom zistenia ich strihovej únosnosti. Skúšky boli realizované na sklolaminátovej kotevnej tyči, zabudovanej do betónovej matrice pomocou organicko – minerálnej živice. Použité materiály boli volené na základe použitia v geotechnickej praxi. Pre potreby tejto diplomovej práce sa navrhli 3 druhy testov odlišných v smere šmykových plôch. Konkrétne sa jedná o uhly  $90^\circ$ ,  $60^\circ$  a  $30^\circ$ . Betónové plochy boli opatrené teflónovou vrstvou pre zníženie vplyvu trenia. Fyzický model teda predstavuje tyč – lepidlo a betónovú maticu reprezentujúcu horninové prostredie.

Samotné strihové testovanie prebehlo v laboratórnych podmienkach na deštrukčnom lise. Predpokladané porušenie sklolaminátovej tyče však nenastalo. Ešte pred porušením výstužného prvku došlo k strate súdržnosti betónovej matrice. Práca však aj napriek tomu analyzuje pôsobenie svorníku, lepidla s ich bezprostredným okolím. Porušenie sa vyznačuje závislosťou na veľkosti odklonu šmykových plôch. Betón sa poruší pri nižších hodnotách zaťaženia, ak je šmyková plocha odklonená od pozdĺžnej osi o menší uhol. Potvrdzuje to aj korelačný koeficient, ktorý určuje svojou hodnotou silnú závislosť. Analýzou pracovne deformačných grafov jednotlivých typov testov sa dospelo k zaujímavým zisteniam pôsobenia výstužnej tyče. Pri ploche kolmej stráca sklolaminátová tyč svoju výstužnú funkciu ihneď po porušení betónovej matrice. Pri zvyšujúcej sa šikmosti však narastá výstužná funkcia tyče aj po strate súdržnosti betónu. Viditeľná je aj prítomnosť ohybového namáhania sústavy.

Záverom je vhodné upozorniť na niektoré faktory ktoré by sa mali brať do úvahy pri budúcich obdobných testoch. Pri cielenom testovaní sklolaminátových tyčí by sa mala použiť mohutnejšia matica, ktorá by odolala zvýšeným napätiam. Taktiež by bolo vhodné zamedziť zdvíhaniu koncov vzoriek a tak obmedziť vplyv ohybu na minimálnu úroveň. V budúcnosti by bolo vhodné doplniť sériu fyzických modelov o modely numerické a ich analýzou prispieť k vedomostiam o pôsobení svorníkovej výstuže v horninovom systéme.



---

## POUŽITÁ LITERATÚRA A CITÁCIE

- [01] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [02] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 325 s.
- [03] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005, 175 s. ISBN 80-7043-417-1.
- [04] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně. Brno: VUT v Brně, 2008, 94 s.
- [05] HASTÍKOVÁ, A.: *Únosnost tmelených horninových svorníků*: Diplomová práce. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta stavební, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, 2013, Vedoucí práce: VOJTASÍK, K.
- [06] HOLIŠ, J.: *Experimentální stanovení únosnosti tmelených svorníků*: Diplomová práce. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta stavební, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, 2013, Vedoucí práce: VOJTASÍK, K.
- [07] GILBERT, David. *Strength Properties of Fibre Glass Dowels Used for Strata Reinforcement in Coal Mines*. In: *Coal Operators' Conference*. Wollongong: University of Wollongong, 2015, s. 13.
- [08] SUCHÁNEK, Jaroslav, Richard ŠŇUPÁREK a Vladimír KRČMÁŘ. *Horninové svorníky kotvené pryskyřicí: příručka firmy Minova*. Ostrava: Minova Bohemia, 92 s.
- [09] HOBST, Leoš. *Kotvení do hornin*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1975, 443 s.
- [10] ALDORF, Josef. *Mechanika podzemních konstrukcí*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1999, 410 s. ISBN 80-7078-695-7.
- [11] Interní příručka v rámci OKD, *Svorníková výztuž - příručka*

- 
- [12] FRANCZYK, Karel. *Přehled užívaných typů kotvení s důrazem na využití v podzemním stavitelství*. Ostrava.
- [13] Příručky, firemné prospekty a technické listy od výrobců a firem Minova, Stireg, Weidmann, Shöck

## ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 1: Princíp demonštrovaný na bimetalickom článku [02]</i> .....	10
<i>Obr. 2: Výroba sklenených vlákien [01]</i> .....	11
<i>Obr. 3: Schéma pultrúžnej linky [01]</i> .....	16
<i>Obr. 4: Znážornenie nerezaného závitú[13]</i> .....	16
<i>Obr. 5: Niektoré prierezy kotevných tyčí[13]</i> .....	18
<i>Obr. 6: Vystužovanie prieskumnej štólne[13]</i> .....	19
<i>Obr. 7: Vystuženie čelby tunelu[13]</i> .....	19
<i>Obr. 8: Príklad použitia injektážneho svorníku [13]</i> .....	20
<i>Obr. 9: Samozávrtný svorník [13]</i> .....	21
<i>Obr. 10: Vybrané varianty kombinovaných kotiev [13]</i> .....	22
<i>Obr. 11: Schéma injektážnej zostavy [13]</i> .....	22
<i>Obr. 12: Montáž kotvy z jednotlivých prvkov [13]</i> .....	23
<i>Obr. 13: Vkládanie kotvy do vývrtu v čelbe [13]</i> .....	23
<i>Obr. 14: Transport materiálu v roliach[13]</i> .....	24
<i>Obr. 15: Pripravené kotevné prvky[13]</i> .....	24
<i>Obr. 16: Pole napätia okolo podzemného diela[08]</i> .....	26
<i>Obr. 17: Pôsobenie kotvy v horninovom prostredí [08]</i> .....	27
<i>Obr. 18: Schéma vzorky</i> .....	28
<i>Obr. 19: Schéma nastavenia skúšky</i> .....	29
<i>Obr. 20: Vrtacia technika a skúšobné betónové teleso[06]</i> .....	32
<i>Obr. 21: Fáza prípravy skúšobného telesa</i> .....	33
<i>Obr. 22: Jedno strižné a dvoj strižné čelúste[07]</i> .....	35
<i>Obr. 23: Reálne nastavenie skúšky</i> .....	35
<i>Obr. 24: Detail uloženia vzorky pre skúšku strihom</i> .....	36
<i>Obr. 25: Poškodený prostredný diel vzorky</i> .....	37
<i>Obr. 26: Priebeh trhlin u vzoriek typu A</i> .....	39
<i>Obr. 27: Viditeľný ohyb na vzorke B1</i> .....	40

---

## ZOZNAM TABULIEK

<i>Tab. 1: Mechanické vlastnosti vybraných vláken[04]</i> .....	12
<i>Tab. 2: Mechanické vlastnosti vybraných termoplasty[04]</i> .....	14
<i>Tab. 3: Mechanické vlastnosti vybraných reaktoplastov[04]</i> .....	14
<i>Tab. 4: Varianty skúšobných telies</i> .....	30
<i>Tab. 5: Vybrané vlastnosti sklolaminátovej tyče[13]</i> .....	33
<i>Tab. 6: Vybrané mechanické vlastnosti živice GEOFLEX[13]</i> .....	34
<i>Tab. 7: Medzné hodnoty porušení</i> .....	42
<i>Tab. 8: Tabuľka štatistického vyhodnotenia</i> .....	43

## ZOZNAM GRAFOV

<i>Graf 1: Deformačná charakteristika betónu [06]</i> .....	31
<i>Graf 2: Pracovne - deformačný diagram pre vzorky typu A</i> .....	38
<i>Graf 3: Pracovne - deformačný diagram pre vzorky typu B</i> .....	39
<i>Graf 4: Pracovne - deformačný diagram pre vzorky typu C</i> .....	40
<i>Graf 5: Medzné sily pri porušení</i> .....	41
<i>Graf 6: Štatistické vyhodnotenie v grafickej forme</i> .....	44
<i>Graf 7: Upravené medzné sily pri porušení</i> .....	45

---

## ZOZNAM PRÍLOH

CD médium:	Diplomová práca v elektronickej podobe vo formáte PDF
	Protokoly o vykonaných skúškach vo formáte PDF
	Fotodokumentácia prípravy telesa a priebehu skúšok
	Dáta z vykonaných skúšok vo formáte XLS